

Iivari Romakkaniemi

VALOKAARIUUNIN POHJAHUUHTELUN OPTIMOINTI

VALOKAARIUUNIN POHJAHUUHTELUN OPTIMOINTI

Ilvari Romakkaniemi
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, koneautomaatio

Tekijä: Iivari Romakkaniemi

Opinnäytetyön nimi: Valokaariuunin pohjahuuhtelun optimointi

Työn ohjaaja: Esa Törmälä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2015

Sivumäärä: 57 + 6 liitettä

Tässä insinööriyössä oli tarkoituksena löytää optimoidut virtausarvot Outokumpu Tornio Worksin terässulaton valokaariuuni kahden pohjahuuhtelulle. Argon-typipohjahuuhtelun päätarkoituksena on vähentää spontaania CO/CO₂-kaasunmuodostumista uunin kaadon yhteydessä, lyhentää sulatukseen käytettävää aikaa sekä parantaa valokaariuunin sulan saantia lämpötilan tasaantumisen avulla. Tutkimuksissa ja kokeissa tuli ottaa huomioon huuhtelukivien ja pohjamassan kuluminen, jotta laitevaurioilta ja prosessiajan menetyksiltä säästytäisiin.

Tutkimisen aikana koetettiin pitää uuniprosessin muuttujat mahdollisimman vakiona, jotta eri virtausarvojen erot huomattaisiin. Analysoinneissa huomioitiin pelkästään kierrätysmateriaalitoimittajan samankaltaiset romuerät, kahden korin panostukset ja muut prosessihäiriöiden vaikutukset. Valokaariuuniprosessin muuttujat saatiin minimoitua parhaiten tekemällä testiajot saman kierrätysmateriaalierän pitkistä tasesulatuspätkistä.

Insinööriyössä tehtyjen kokeiden ja tarkasteluiden perusteella pohjahuuhtelulla prosessin kannalta tehokkaimmiksi arvoiksi tulkittiin pohjahuuhtelun maksimivirtausnopeudet rosterilaaduilla. Happolaatuja valmistetaan terässulaton linjalla 2 vähemmän, joten näille laaduille samankaltaisia testejä ei voitu tehdä. Ei-tasesulatusten analysointi kuitenkin osoittaa happolaatujen samankaltaisen käyttäytymisen kuin rosterilaaduilla. Pohjamassan ja huuhtelukivien kulumisen takia on kuitenkin mahdotonta käyttää maksimivirtausarvoja koko uunikampanjan ajan.

Jatkotoimenpiteinä tulisi tutkia, mitkä ovat maksimivirtausarvot, joilla uunin pohjamassan ja huuhtelukivien kuluminen olisi optimaalisinta vaarantamatta tuotantoa. Lisäksi on syytä harkita pohjamassan, huuhtelukivien ja -putkien lukumäärän lisäämistä ja koon suurentamista. Sekoittumisen lisäämistä ja siten tuotannon tehostamista voi harkita myös elektromagneettisilla sekoittimilla (EMS – Electromagnetic Stirring).

Asiasanat: valokaariuuni, ruostumaton teräs, pohjahuuhtelu, tuotannon optimointi

ALKULAUSE

Opinnäytetyö on tehty Outokumpu Stainless Oy:n toimeksiannosta. Työn ohjaajana ja valvojana toimi Oulun ammattikorkeakoulun lehtori Esa Törmälä ja Outokumpu Stainless Oy:n kehitysinsinööri filosofian maisteri Kimmo Vallo.

Haluan kiittää työn ohjaajia sekä Marko Kontiota, Juho Kuneliusta ja Eero Aueria, joiden apu on ollut korvaamatonta.

Oulussa 22.5.2015

Ilvari Romakkaniemi

SANASTO

AOD – Argon Oxygen Decarburization

CRK – ferrokromikonvertteri

FeCr – ferrokromi

HC52 – korkeahiilinen ferrokromi

happolaatu – haponkestävä teräslaji

konvektio – pakotettu ainepitoisuuksien tasapainotus

kukkupanostus – kierrätysmateriaali jää koholle panostettaessa uuniin, jolloin uunin holvi ei sulkeudu

kuohunta – spontaani CO/CO₂-kaasunmuodostus sulateräksen ja kuonan kosketuksessa

kWh – kilowattitunti

Nm³ – Normikuutiometri

romu – valokaariuunin panostettava kierrätysteräsmateriaali

rosterilaatu – ruostumaton teräslaji

saanti – valokaariuuniin panostetun materiaalin määrä jaettuna sieltä saadun materiaalin määrällä muunnettuna prosenteiksi

SiC – piikarbidi

tase – sulatus, josta määritetään kierrätysmateriaalierän ainepitoisuudet

t – tonni, 1000 kg

VKU – valokaariuuni

SISÄLLYS

ALKULAUSE.....	4
SANASTO.....	5
1 JOHDANTO	8
2 JALOTERÄSSULATTO	9
2.1 Yleistä Outokummusta	9
2.1 Jaloterässulaton toiminta.....	9
2.2 Teräslajit.....	10
3 VALOKAARIUUNI.....	12
3.1 Yleistä	12
3.2 Tornion valokaariuunin rakenne	12
3.3 Kierrätysteräs, panostus ja lastaus.....	14
3.4 Seosaineet	14
3.5 Sulatuksen kulku	15
3.6 Valokaariuunin termodynamiikka.....	16
3.6.1 Kromin hapettuminen	16
3.6.2 Piin vaikutus kromiin	16
3.6.3 Hiilen vaikutus kromiin	17
3.7 Valokaariuunin kuona.....	19
3.7.1 Kuonan muodostaminen	19
3.7.2 Kuohuva kuona	19
3.8 Energiatase	20
3.9 Valokaariuunin argon-typpipohjahuuhtelu	22
3.9.1 Yleistä	22
3.9.2 Rakenne ja toimintaperiaate	24
3.10 Kylkipolttimet	26
4 POHJAHUUHTELUN VIRTAAUSARVOJEN TUTKIMINEN JA TAUSTATIEDOT	28
4.1 Mittausten suorittaminen	28
4.1.1 Pohjahuuhtelun tavoitteet.....	28
4.1.2 Mittausvirheiden minimointi.....	28
4.1.3 Vertailtavat suureet.....	29
4.2 Pohjahuuhtelun ja kylkipolttimien alustava tarkastelu.....	30

4.3	Sulatusten vertailu ja saannin vaikutus analysointeihin	30
5	TUTKIMUSJAKSO M2.....	32
5.1	Kouhuminen rosteri- ja happolaaduilla	32
5.2	Konvektio rosteri- ja happolaaduilla.....	33
5.3	Sulatusnopeus rosteri- ja happolaaduilla.....	33
5.4	Pohjahuuhtelun virtausarvojen analysointi M2	34
5.4.1	Rosterilaadun virtausarvojen analysointi.....	35
5.4.2	Happolaadun virtausarvojen analysointi.....	37
6	YHTEENVETOJAKSO M3.....	39
6.1	Kierrätysmateriaalin toimittajat	39
6.2	Virtausarvojen analysointia rosteri- ja happolaaduilla M3.....	41
6.2.1	Kuohuminen rosterilaaduilla.....	42
6.2.2	Konvektio rosterilaaduilla	42
6.2.3	Sulatusnopeus rosterilaaduilla	43
6.2.4	Saanti rosterilaaduilla.....	43
6.2.5	Happolaadun virtausnopeuksien analysointi	44
7	TARKISTUS- JA YHTEENVETOJAKSO M4	46
7.1	Ei-tasetetit.....	46
7.1.1	Kuohuminen rosterilaaduilla.....	46
7.1.2	Konvektio rosterilaaduilla	47
7.1.3	Sulatusnopeus rosterilaaduilla	47
7.1.4	Saanti rosterilaaduilla.....	48
7.1.5	Virtausarvojen analysointi happolaaduilla	48
7.2	Tasetetit.....	49
7.3	Pohjahuuhtelukivien kuluminen	51
7.4	Muut huomiot ja jatkotutkimukset	53
8	YHTEENVETO	55
	LÄHTEET	56
	LIITTEET	58

1 JOHDANTO

Vuonna 2013 ruostumattoman teräksen osuus koko maailman 1,6 miljardista tuotetusta terästonnista oli noin 2,4 prosenttia. Ruostumattoman teräksen kulutus on kasvanut viime vuosikymmeninä nopeammin kuin minkään muun metallin kulutus kaupungistumisen, kuljetuksen, energiateollisuuden ja elintarviketuotannon kasvun vuoksi. Ruostumaton teräs kestää kuumuutta sekä korroosiota, ja sen lisäksi se on esteettinen ja täysin kierrätettävä materiaali. (1, s. 9.)

Outokumpu Stainless Oy:n Tornio Worksin terästehdas on kierrätysterästä käyttävä ruostumattoman teräksen valmistaja. Tornio Worksiin kuuluvat Elijärven kromikaivos, ferrokromitehtaat, jaloterässulatto, kuumavalssaamo ja kylmävalssaamot 1 ja 2.

Terässulaton tuotantopaineet ovat kasvaneet Inoxum-yrityskaupan takia. Tornion jaloterästehtaan tavoitteena on nostaa tuotantokapasiteettinsa sille tasolle, että Saksan Bochumin terässulatto pystyttäisiin sulkemaan. Tästä syystä jaloterässulaton 2-linjan tuotantoa on nostettava. Terässulaton 2-linjaa hidastava tekijä on ollut valokaariuunin toiminta, minkä vuoksi sen tuotantokapasiteettia tehostettiin vuoden 2014 syksyllä vuosihuoltoseisokin aikana valokaariuuniin asennetuilla kylkipolttimilla ja argon-tyypipohjahuuhtelulla.

Tämä opinnäytetyö rajoittuu käsittelemään valokaariuunia ja sen pohjahuuhtelua. Tavoitteena on löytää tuotannon kannalta optimaaliset pohjahuuhtelun virtausarvot, joilla kaadon yhteydessä tapahtuvan kuonan kuohumisen riski pieneneisi, teräksen sulatus nopeutuisi ja sulan saanti paranisi.

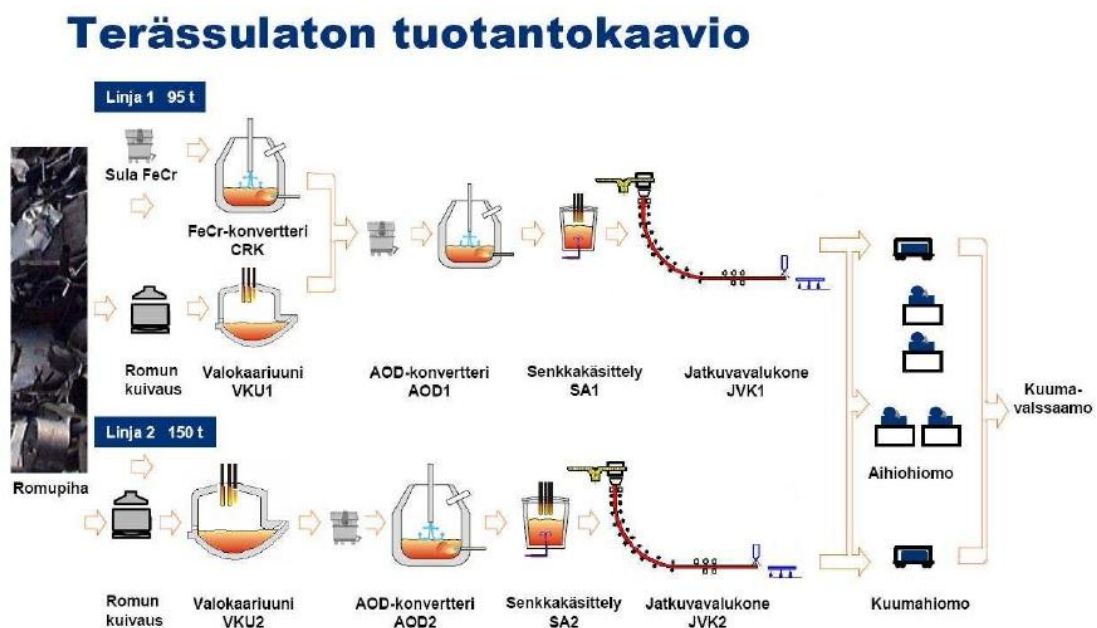
2 JALOTERÄSSULATTO

2.1 Yleistä Outokummusta

Outokumpu on maailman johtavia ruostumattoman teräksen tuottajia niin tutkimuksen, kehityksen kuin teknisen tukensakin osalta. Outokumpu tunnetaan tuotelaadustaan, erinomaisista standarditeräksistään EN 1.4301 (ASTM 304) ja erikoisteräksistään kuten duplex-teräksistään. Outokumpu on globaali yritys, jonka suurimmat tuotantolaitokset ovat Suomessa, Ruotsissa, Saksassa, Isossa-Britanniassa, Yhdysvalloissa, Meksikossa ja Kiinassa. Outokummun osuus ruostumattoman teräksen valmistuksesta oli vuonna 2013 Euroopassa 34 % ja koko maailmassa 8 %. Tornion tuotantolaitos on yksi maailman kustannustehokkaimmista ja integroiduimmista ruostumattoman teräksen tuotantolaitoksista, jotka keskittyvät standarditerästen suurtuotantoon. (1, s. 9.)

2.1 Jaloterässulaton toiminta

Tornion jaloterässulatto koostuu kahdesta erillisestä ruostumattoman teräksen tuotantolinjasta. Linja 1 on aloittanut tuotannon vuonna 1976, ja sen panoskoko on 95 tonnia. Linja 2 puolestaan on valmistunut 2002 ja sen panoskoko on 150 tonnia. Kuvassa 1 on esitelty molempien terässulattojen tuotantokaaviot.



KUVA 1. Jaloterässulaton tuotantokaavio (2)

Jaloterässulaton tuotanto alkaa romupihalta, josta pääosin kierrätysteräksestä koostuva raaka-aine lastataan siltanostureilla romukoreihin. Romukorit kulkevat junilla valokaariuunille, minkä jälkeen ne joko kuivataan tai panostetaan suoraan uuniin. Valokaariuunissa sulatetaan ja seostetaan sula sopivaksi AOD-konvertterille, minkä jälkeen uuni kaataa sulan siirtosenkkaan. Senkka kuljetetaan AOD-konvertterille, jossa sulasta muokataan matalahiilistä ruostumatonta terästä. Tämän jälkeen sula kipataan konvertteristä valusenkkaan, joka kuljetetaan senkka-asemalle. (2.)

Senkka-asema toimii puskurina AOD-konvertterin ja jatkuvavalukoneen välillä. Senkka-asemalla sulan koostumus ja lämpötila täsmätään sopivaksi, ja sen jälkeen valusenkka nostetaan valukoneelle. Jatkuvavalukoneella valetaan yhtäjaksoisesti useamman senkan sekvenssejä, minkä jälkeen sula teräs on muuttunut valunauhaksi. Valunauhat katkotaan polttoleikkuukoneella sopivan mittaisiksi aihioiksi. Suurin osa aihioista voidaan tässä vaiheessa kuljettaa kuumavalssaamolle, mutta joistakin aihioista joudutaan poistamaan pintaviat hiomalla. (2.)

Linjan 2 toiminnasta poiketen linjalla 1 käytetään ferrokromisulaa, joka tulee ferrokromitehtaan uppokaariuuneilta. Ferrokromikonvertterissa (CRK) käsitelty ferrokromisula panostetaan VKU-sulan kanssa linja 1:n AOD-konvertterille. Linja 2:n tehtävä on tuottaa suuria määriä austeniittisia ruostumattomia teräslajeja sekä haponkestäviä teräslajeja massatuotannolla halvoista nikkeliilähteistä eli seostetusta kierrätysteräksestä. Linja 1:llä valmistetaan ferriittisiä teräslaatuja sekä tuotantomäärältään pienempiä austeniittisia teräslajeja, joiden valmistus on vaativampaa. (2.)

2.2 Teräslajit

Ruostumatomalla teräksellä tarkotetaan terästä, jolla on hyvä korroosionkestävyys verrattuna tavalliseen niukkaseosteiseen teräkseen. Hyvä korroosionkestävyys aiheutuu teräksen kromipitoisuudesta, joka teräksessä on yli 10,5 %. Korroosionkestävyyttä voidaan parantaa myös lisäämällä seosaineksi molybdeeniä. Austeniittisen ruostumattoman teräksen ominaisuuksia ovat hyvä muokattavuus, hitsattavuus sekä magneettisuuden puuttuminen, jotka mahdollistavat sen käytön äärimmäisissä olosuhteissa, kuten kloridipitoisessa ympäristössä. (3.)

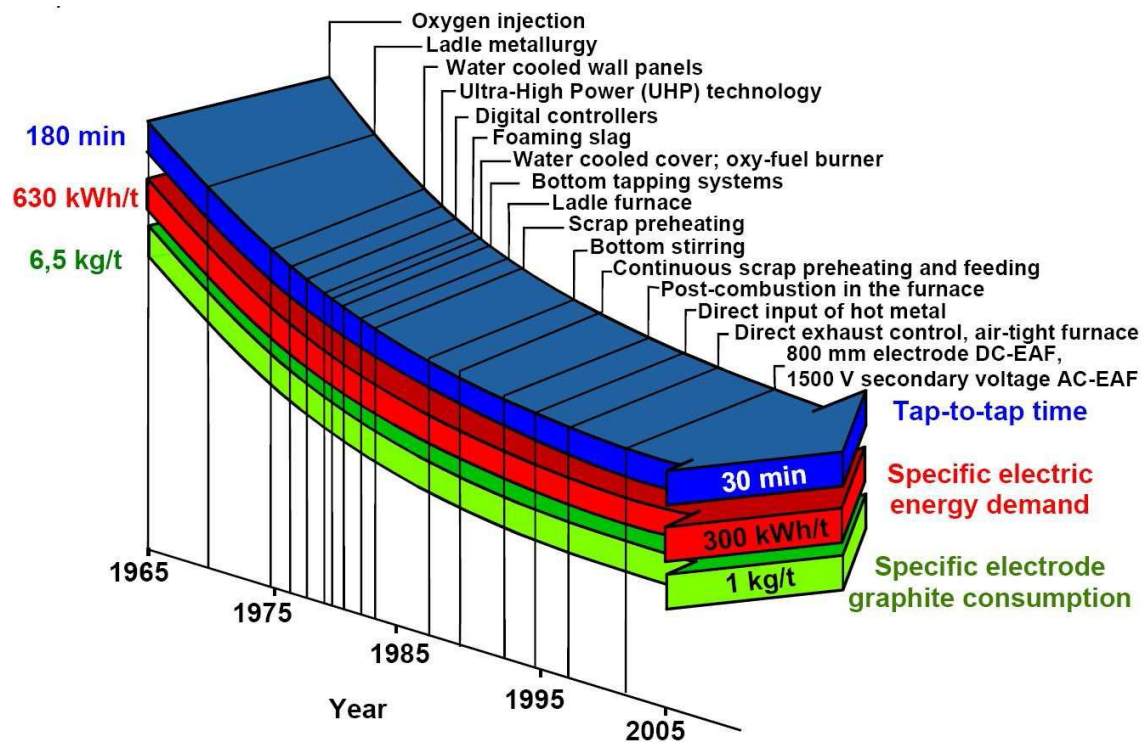
Suurin osa Tornion jaloterässulaton linjalla 2 valmistettavista austeniittisista teräslaaduista voidaan jakaa kahteen teräslajiin: kromi-nikkeli- (Cr-Ni) ja kromi-nikkeli-molybdeeni-laatuihin (Cr-Ni-Mo) ja niiden alalajeihin. Cr-Ni on niin sanottu rosterilaatu, jolla on hyvä korroosionkestävyys, ja se sisältää noin 18 % kromia ja 8 % nikkeliä. Cr-Ni-Mo on niin sanottu happolaatu, jolla on vielä parempi korroosionkestävyys kuin Cr-Ni laadulla. Siihen sisältyy noin 17 % kromia, 10 % nikkeliä ja 2 % molybdeenia. (3.)

Rosteri- ja happolaatutyypit voidaan jakaa tasesulatuksiin ja ei-tasesulatuksiin. Tasesulatuksissa käytetään ainostaan yhtä kierrätysmateriaalierää. Tällä tavoin määritetään kierrätyserän koostumus, joka määrittää hinnan kierrätyserälle. Tämän vuoksi tasesulatukset on tarkoitus tehdä hallitusti ilman keskeytyksiä ja muina panosmateriaaleina käytetään ainoastaan tunnettuja raaka-aineita. (3.)

3 VALOKAARIUUNI

3.1 Yleistä

Teräksen valmistuksessa valokaariuuni on kehittynyt vuosikymmenien saatossa huomattavasti. Näillä parannuksilla on vähennetty käytettyä energiaa tuotettua terästonnia kohden, minimoitu elektrodien kuluminen ja nopeutettu tuotantoprosessia (kuva 2). Kehittyneitä menetelmiä ovat muun muassa happilanssauksen kehittyminen, kuonan koostumuksen ja kuohumisen hallittavuus sekä kemiallisen energian hyväksikäyttäminen.



KUVA 2. Valokaariuunin kehitys (4)

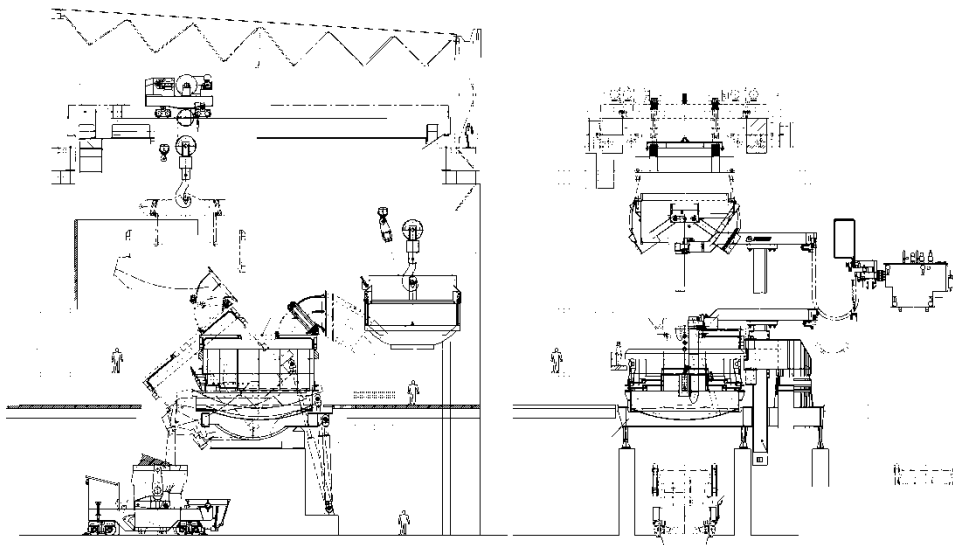
3.2 Tornion valokaariuunin rakenne

Tornion valokaariuuni 2 koostuu padasta, vesijäähdytetystä holvista ja grafiittielektrodeista. Tyypiltään valokaariuuni on vaihtovirtauuni. Sähköenergian syöttö tapahtuu kolmen grafiittielektrodin kautta holvin keskiosan läpi. Grafiittielektrodien halkaisija on 710 mm, ja niitä kannattavat virtaa johtavat elektrodiairit. Elektrodiairit on kytketty muuntajaan kaapeleilla, ja niitä kannattelee kääntyvä kääntökehä. Uunin pata koostuu tulenkestävällä vuorauksella ja kiinteällä kaatonokalla varustetusta alavaipasta ja vesijäähdytetystä ylävaipasta. Alavaipan

tulenkestävä eristys on mitoitettu siten, että se yltää noin 500 mm sulapinnan yläpuolelle. Ylävaippa koostuu 15 erillisestä vesipaneelista ja on siten täysin vesijäähdytetty. Holvin jäähdytys tapahtuu neljällä vesijäähdytetyllä paneelilla, ja sen keskiosa on tulenkestävää materiaalia. (5, s. 5 - 7.)

Uunin pata on kiinnitetty erilliseen kehtoon, jota pystytään kallistamaan sylinterin avulla kaadon aikana. Romukorin panostuksen aikana armit ja elektrodit ajetaan sivuun kääntökehän avulla. Lisäksi elektrodien kääntökehä liikkuu uunin mukana kaadon aikana. Valokaariuunin holvi on varustettu seosaineiden syöttöä varten suppilolla sekä savukaasujen poistokäyrällä, joka on liitetty savukaasujen puhdistusjärjestelmään. Savukaasut poistuvat vesijäähdytetyn käyrän ja pudotuskotelon kautta. Poistokaasut puhdistetaan letkusuodatinjärjestelmässä. (5, s. 7 - 12.)

Valokaariuunin kuonan muodostamiseksi holvissa on neljä aukkoa kalkin injektointia varten (5, s. 5). Sulatusprosessin nopeuttamiseksi happea injektoidaan kylkipolttimien kautta uuniin sulatuksen loppupuolella (3). Uunin kapasiteetti on 140 t, panostilavuus 200 m³ ja muuntajan kapasiteetti 160 MVA (kuva 3).



KUVA 3. Tornion tehtaan valokaariuunin layout (5, s. 6)

3.3 Kierrätysteräs, panostus ja lastaus

Valokaariuuni käyttää raaka-aineenaan pääosin kierrätysterästä. Se on valokaariuunin suurin ja niin kustannuksiltaan kuin määrältäänkin tärkein raaka-aine. Kierrätysteräkset voidaan jakaa neljään päätyyppiin: haponkestävään ja ruostumattomaan ostokierrätysteräkseen sekä tehtaan sisäisestä kierrosta tuleviin haponkestäviin ja ruostumattomiin kierrätysmateriaaleihin. Nämä kierrätysmateriaalit voivat olla nauhoja, levyjä tai muuta sen tyyppistä materiaalia. Kierrätysteräksen koko, tiheys ja ainepitoisuudet vaikuttavat huomattavasti uunin prosessiin. (6, s. 14.)

Sulatuskohtaisen panoslaskelman ja korintäyttöohjeen mukaisesti kierrätysteräs lastataan kahmarinosturilla romupihalta panostuskoreihin, joista ne kuljetetaan dieseljunien avulla uunille. Uuniin panostettavien korien lukumäärä riippuu kierrätysteräksen tiiviydestä ja tiheydestä. Talvisin ja joskus myös kesäisin panoskoreja joudutaan kuivattamaan ennen uuniin panostusta, koska kierrätysmateriaalin mukana tuleva lumi, jää ja vesi voivat aiheuttaa räjähdyksen. (6, s. 14.)

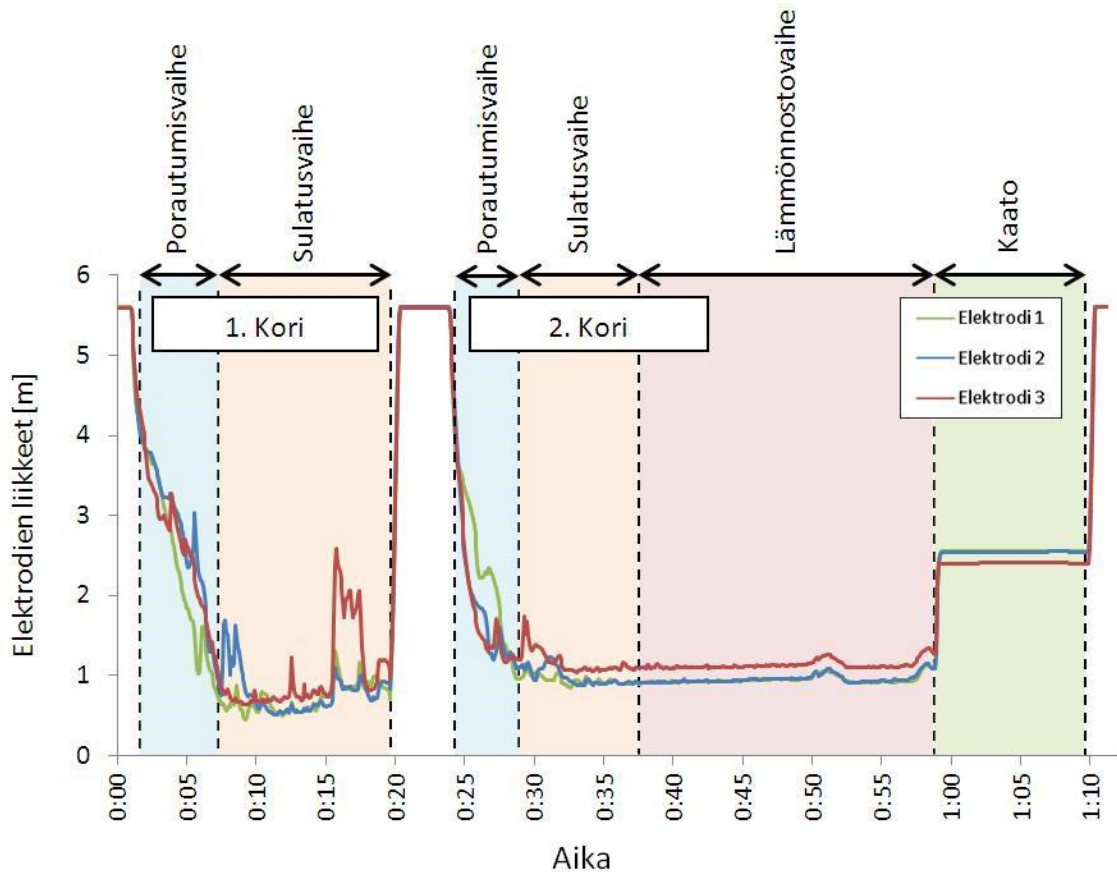
Sulatuksen ensimmäiseen koriin lastataan mahdollisimman suuri osa sulatettavasta panoksesta, jotta tarvittavien korien määrä saataisiin minimoitua. Korin pohjalle lastataan kevyttä, suurikokoista materiaalia, joka edesauttaa korien aukeamista ja säästää uunin vuorausta. Tämä ehkäisee myös hienojakoista materiaalia tippumasta pois ennenaikaisesti. Tämän jälkeen koriin lastataan tiivistä ja raskasta materiaalia ja lopuksi kevyttä kierrätysmateriaalia, johon elektrodien on helppo pureutua. (6, s. 13 - 14.)

3.4 Seosaineet

Kierrätysteräksen, hiontapölyn ja kuonanmuodostajana käytettävän kalkin lisäksi uuniin panostetaan erillaisia seosaineita siilojärjestelmän avulla. Näitä ovat muun muassa FeCr-erote HC4-22 tai palakromi HC52, koksia tai antrasiittia ja tarvittaessa piikarbidia (SiC) tai ferropiitä (FeSi). Lisäämällä FeCr-raaka-ainetta teräkseen saadaan sopiva kromipitoisuus. Kromiraaka-aine lisätään prosessin alkuvaiheessa, jotta sen sisältämät pii ja hiili ehkäisisivät kromin hapettumista. Koksia käytetään lisäpelkistimenä. Koksi suojaa välillisesti kromia hapettumasta. SiC:lla korvataan FeSi:tä sen edullisuuden takia. (7, s. 23.)

3.5 Sulatuksen kulku

Sulatuksen kulku voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen, jotka ovat porautumis-, sulatus- ja lämmönnostovaihe. Valtaosa käytetystä ajasta kuluu panosmateriaalin sulattamiseen. Kuvassa 4 on esitetty tavanomainen kahden korin sulatuksen jakautuminen eri vaiheisiin elektrodien liikkeiden perusteella.



KUVA 4. Sulatuksen jakautuminen eri sulatusvaiheisiin (6, s. 17)

Porautumisvaiheen aikana elektrodit uppoavat panokseen lyhyellä valokaarella ja saavuttaessaan riittävän syvyyden valokaaren pituutta kasvatetaan. Tästä syntyvä lämpöenergia siirtyy tehokkaasti elektrodeja ympäröivään kierrätysteräkseen. Valokaaren pituus on suoraan verrannollinen käytettävään jännitteeseen. Vaiheen kesto määrittyy elektrodien laskeutumisnopeudesta, johon puolestaan vaikuttaa panosmateriaalin tiheys ja syöttöteho. Kun panosmateriaalin tiheys lähestyy arvoa 7 t/m^3 , porautumisvaihe päättyy. (8, s. 154.)

Sulatusvaiheessa osa kuonanmuodostajista sulaa ja lämmön siirtyminen leveyssuunnassa kiihtyy. Valokaaret lennättävät jo sulanutta metallia ja kuonaa seinämien peitteinä olevien

kierrätysmateriaalien päälle. Valokaarten aiheuttama plasmavirtaus työntää sulaa elektrodeista pois päin, jolloin se sulattaa seinämien vieressä olevien kasojen alapuolella olevaa materiaalia, mikä aiheuttaa kasojen romahtamista. Kun kierrätysmateriaalin romahtelut ovat loppuneet ja uuniin on muodostunut metallisulaa peittävä kuona, on lämmönnostovaihe alkanut. (8, s. 19.)

Sulan saavutettua tavoitelämpötilan, 1 580 celsiusastetta, suoritetaan kaato. Valokaariuunin kyljessä on kaatoaukko, josta kuona ja teräs kaadetaan siirtosenkkaan. Kuona menee ylitteensä erilliseen vaunulla sijaitsevaan kuonapataan. Senkkaan jäänyt kuona laapataan pois ennen kuin metallisula panostetaan AOD-konvertteriin. (3.)

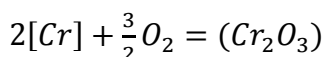
3.6 Valokaariuunin termodynamiikka

Valokaariuunin termodynamiikan tunteminen on edellytys uunin toiminnan ymmärtämiselle. Kaikki alkuaineiden reaktiot tapahtuvat kolmen faasin ympäristössä. Nämä reaktiot tapahtuvat atmosfääriin kaasun, kiinteän panoksen tai sulan ja kuonan välillä. Tärkeimpiä ovat kromin, piin, hiilen ja hapen vuorovaikutukset. Muita reaktioihin osallistuvia alkuaineita ovat titaani, alumiini, mangaani, molybdeeni, rauta ja niobi. Koska kromi on arvometalli, jota halutaan säilyttää sulassa, on tärkeä tuntea siihen vaikuttavat reaktiot. (9.)

3.6.1 Kromin hapettuminen

Kromin säilyttämiseksi sulassa on vältettävä sen hapettumista ja kromioksidin menettämistä kuonaan sulatuksen aikana.

Kromi hapettuminen tapahtuu yleensä kaavan 1 mukaisesti (7, s. 21).



KAAVA 1

Cr = Kromiatomi

O₂ = Happomolekyyli

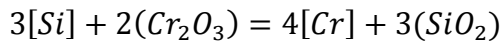
Cr₂O₃ = Kromioksidi

3.6.2 Piin vaikutus kromiin

Piillä on merkittävä vaikutus kromin kuonautumisen hallinnassa. Pii suojaa kromia hapettumiselta hapettumalla itse voimakkaasti, minkä ohella se voi pelkistää kromioksidia esimerkiksi kaadon

yhteydessä kuonan ja teräksen sekoittumisen aikana. (10, s. 34) Piioksidit vaikuttavat kuonan ominaisuuksiin tekemällä kuonasta sulaa ja juoksevaa, jolloin se suojaa terässulaa hapettumiselta. Tämän takia piin hallinta sulassa on hyvin tärkeää. (3.)

Kromin pelkistyminen piin vaikutuksesta tapahtuu kaavan 2 mukaisesti (10, s. 34).



KAAVA 2

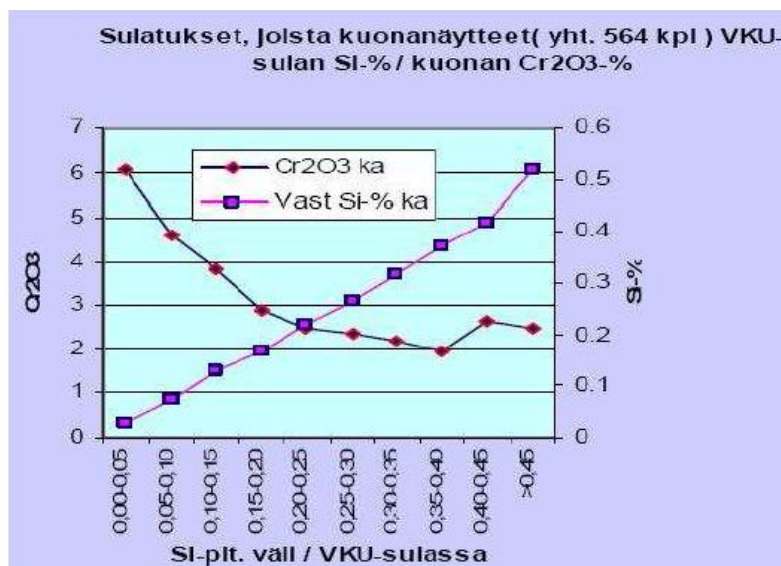
Si = Piiatomi

Cr₂O₃ = Kromioksidi

Cr = Kromiatomi

SiO₂ = Piioksidi

Piipitoisuus sulassa seuraa kromin hapettumista sulassa teräksessä. Kuten kuvassa 5 on havainnollistettu, loppusulan piipitoisuuden tulisi olla 0,1 - 0,25 p-%. Suuremmat kuonapitoisuudet eivät vähennä huomattavasti kromin kuonaantumista, ja mitä suurempi piipitoisuus sulassa teräksessä on, sitä kauemmin joudutaan AOD:lla puhaltamaan piitä pois ennen kuin hiili alkaa palaa ja kuonamäärät kasvaa. (10, s. 18.)



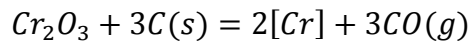
KUVA 5. Sulan piipitoisuuden vaikutus kuonaantuneen kromin määrään (7, s. 19)

3.6.3 Hiilen vaikutus kromiin

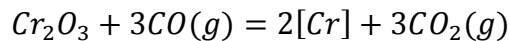
Hiili kykenee välillisesti estämään kromin hapettumista muodostamalla palamisellaan pelkistävemmän atmosfääriin, jolloin piin ja kromin palaminen hidastuu. Kuvassa 6 on esitetty

hapettumis-pelkistymis-reaktioita vapaan Gibbs'n energian ja lämpötilan funktiona. Sulatuksen loppuvaiheessa hiili pystyy pelkistämään kromia kuonasta, mikäli hiilipitoisuus ja lämpötila ovat riittävän korkeita. (7, s. 22 - 23.)

Pelkistyminen voi tapahtua reaktioiden 3 ja 4 mukaisesti (7, s. 22 - 23).



KAAVA 3



KAAVA 4

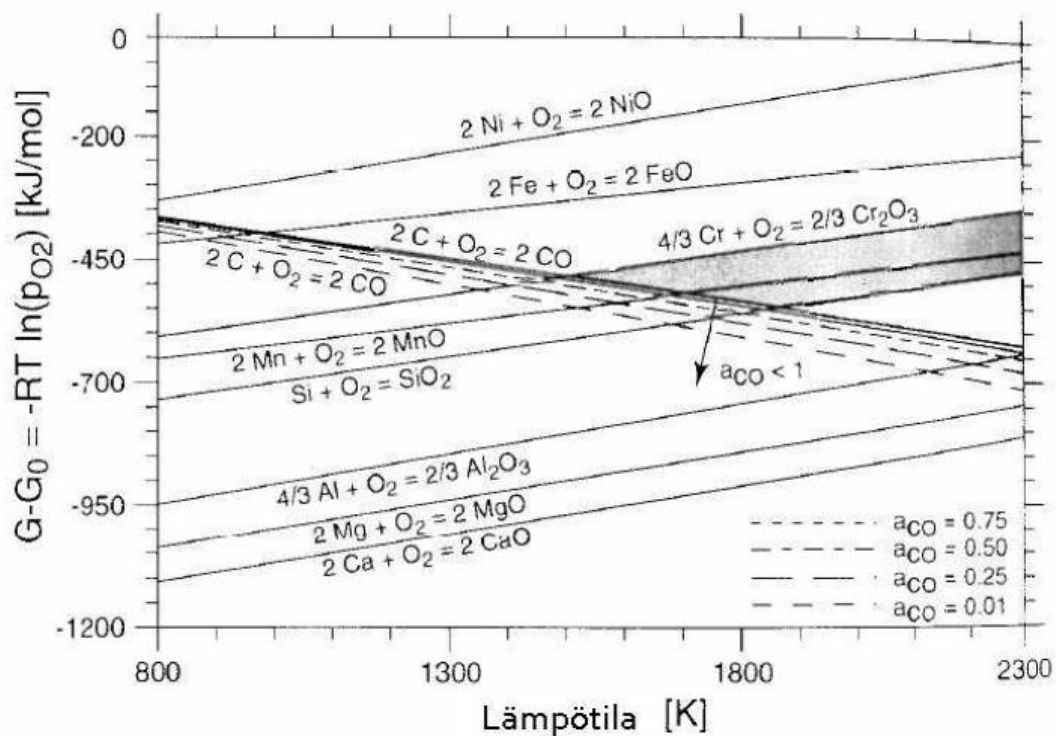
Cr_2O_3 = Kromioksidi

Cr = Kromiatomi

C (s)= Hiiliatomi kiinteässä olomuodossa

CO(g) = Hiilimonoksidi kaasumaisessa olomuodossa

CO₂(g) = Hiilidioksidi kaasumaisessa olomuodossa



KUVA 6. Hapettumisreaktioita rautasulassa vapaan Gibbs'n energian ja lämpötilan funktiona (11, s. 37)

3.7 Valokaariuunin kuona

Valokaariuunin kuonalla on useita tärkeitä tehtäviä kuten suojata terästä atmosfääriin aiheuttamalta hapetukselta, vastaanottaa teräksen epäpuhtaudet (pääasiassa oksidit), suojata uunin vuorausta valokaarelta ja pienentää teräksen lämpöhukkaa. Kuonan tavoitteeksi on asetettu, että kuonan kromioksidipitoisuus jäisi alle 5 p-%:n 95 %:ssa sulatuksista. Kuona on puolijohde, joka ei johda sähköä hyvin, vaan pakottaa valokaaren etsimään itselleen lyhyimmän reitin paremmin johtavaan aineeseen eli terässulaan. Tällä tavoin sulatuksesta tulee energiatehokkaampi, mikä lyhentää sulatusaikaa ja pienentää energiatappiota. (12, s. 21 - 22.)

3.7.1 Kuonan muodostaminen

Sulan kuonan muodostaminen mahdollisimman aikasessa vaiheessa on hyvin tärkeää, jotta se suojelisi terästä ja uunin vuorausta. Kuonan pääkomponentteja ovat CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, Cr₂O₃ ja lisäksi pienemmissä määrin MnO ja TiO₂. (7, s. 22.) Taulukossa 1 on erään sulatuksen kuonanäyteanalyysi. Sulatuksen loppupuoella kuona koostuu pääsääntöisesti sulista oksideista, mutta myös metallipisaroista. Kuonanmuodostajina käytetään pääasiassa poltettua kalkkia (KAMU), vuoraustiilimursketta (CaO x MgO) ja dolomiittikalkkia (CaO x MgO). (12, s. 35.)

TAULUKKO 1. Qmadosta haetut eräiden sulatusten kuonanäytteet

Sulatustyyppi	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO
Ruostumaton	44,4	29,6	8,7	2,1	4,2	3,8	1,3	2,2
Haponkestävä	41,2	30,3	6,1	2,4	7,8	3,6	1,5	3,7

Kuonan muodostamisessa on tärkeää huomioida kuonan emäksisyys. Liian hapan kuona tuhoaa vuorausta, ja liian emäksinen kuona heikentää kuonan juoksevuutta, mikä vaikuttaa suojausvaikutukseen heikentävästi. (12, s. 34.)

3.7.2 Kuohuva kuona

Valokaariuunin kuonan kuohuminen aiheutuu kaasukuplien nousemisesta kuonasulan pinnalle. Kuona kuohuu, mikäli sen läpi virtaa riittävällä virtauksella kaasua ja kuona pystyy pidättämään kaasukuplat muodostamalla kuona-kaasuvaahtoa. Tätä vaahtoa muodostuu, mikäli kuplat eivät ehdi hajota ennen uusien kuplien nousemista pinnalle. Tämän vuoksi kuonan tilavuus kasvaa.

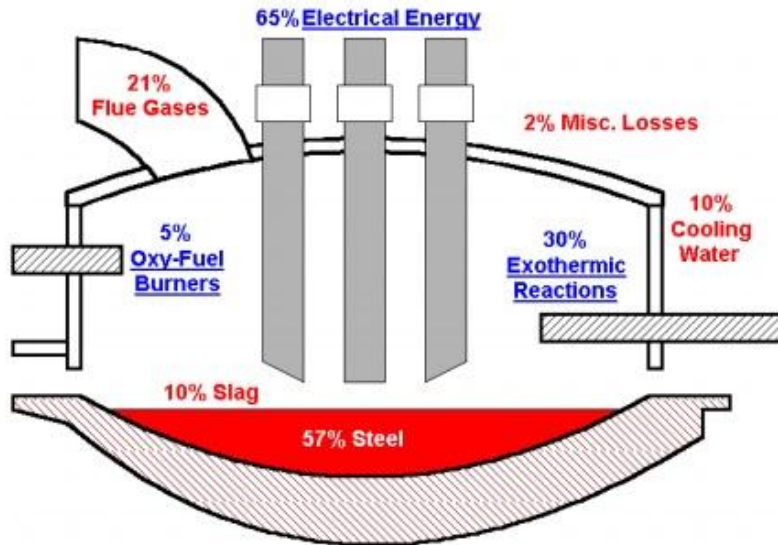
CO/CO₂-kaasua muodostuu tavallisesti oksidien reagoiessa sulan metallin kanssa. Metallisulan hiili pelkistää metallioksideja synnyttäen reaktiotuotteena hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. (6, s. 21.)

Sulatuksen aikana tapahtuva kuonan kuohuminen tuo useita etuja prosessiin. Kuohuminen vähentää valokaarista uunin seinämille kohdistuvaa lämpösäteilyä peittämällä valokaaret paksummalla kuonakerroksella. Uunin vuorauksien päälle roiskuu kuonaa suojaavaksi kerrokseksi. Tämä myös mahdollistaa suurempien jänniteportaiden käytön sulatuksen loppuun asti, mikä vaikuttaa positiivisesti sulatustehokkuuteen. Muita hyötyjä ovat kuonan eristävät vaikutukset uunin kattoon kohdistuvaa säteilyä, sähköistä kohinaa ja melun voimakkuutta vastaan, joiden lisäksi kuona suojaa terästä uunin atmosfääriltä. (6, s. 24.)

Ongelma Tornion valokaariuuni 2:lla on kaadon yhteydessä tapahtuva kuonan äkillinen kuohuminen. Kuonan kuohuminen kaadon yhteydessä hidastaa sulan kippaamista senkkaan ja voi aiheuttaa laitevaurioita. Kuohumista pystytään ehkäisemään vaikuttamalla kaasua muodostaviin reaktioihin, muokkaamalla kuonan ominaisuuksia tai vaikuttamalla kuonassa oleviin kaasukupliin. Kaasukuplien kalvojen rikkominen vähentäisi kuohumista esimerkiksi tuottamalla systeemiin suuria kaasukuplia. Torniossa on yritetty hillitä kuohumista esimerkiksi rikkomalla kuonan pintaa vesisuihkulla. (6, s. 25.)

3.8 Energiatase

Valokaariuunin energiataseella tarkoitetaan termodynamiikan ensimmäistä sääntöä eli energian säilymisen lakia. Energia voi esiintyä eri muodoissa ja se voi muuttua muodosta toiseen, mutta energiaa ei voi syntyä eikä hävitä itsekseen. Seuraavalla sivulla esitetyssä kuvassa 7 on tyypillinen valokaariuunin energiatase. (13, s. 211 - 232.)



KUVA 7. Valokaariuunin energiatase (14)

Kuvassa 7 on havainnollistettu valokaariuunin energiatasemalli, josta nähdään prosessiin tulevan ja lähtevän energian määrä. Noin 65 prosenttia kokonaisenergiankulutuksesta tulee sähköenergiasta, 30 prosenttia kemiallisesta energiasta ja loput 5 prosenttia kaasupolttimista. Kokonaisenergiasta 57 prosenttia kuluu teräksen sulattamiseen ja 10 prosenttia kuonan sulatukseen. Erillaiset lämpöhäviöt vievät lopun energian valokaariuunin sulatusprosessista. (14.)

Yksinkertaistuna valokaariuunin energiatase tarkoittaa kaavaa 5 (14.)

$$\text{Energia sisään} = \text{Energia ulos} + \text{Energiahäviöt}$$

KAAVA 5

Tarkemmassa tarkastelussa kaava 5 voidaan johtaa valokaariuunin energiataseyhtälökaavaan 6, joka kuvaa valokaariuunin sisälle ja sieltä ulos tulevia energiavirtoja (14.)

$$E_{tot} = \eta_{el} \cdot E_{el} + \Sigma E_{chem} = E_{steel} + E_{slag} + E_{offgas} + E_{cool} + E_{extra} + E_{other}$$

KAAVA 6

E_{tot} = valokaariuuniin käyttämä kokonaisenergia (kWh)

η_{el} = korkeajännitejärjestelmän hyötysuhde

E_{el} = käytetty sähköenergia (kWh)

ΣE_{chem} = kemiallisten reaktioiden lämpösisältö (kWh)

E_{steel} = teräksen lämpösisältö (kWh)

E_{slag} = kuonan lämpösisältö (kWh)

E_{offgas} = savukaasujen lämpösisältö (kWh)

E_{cool} = jäähdytysjärjestelmään siirtyvä lämpösisältö (kWh)

E_{extra} = kylkipolttimien ja pohjahuuhtelun lämpösisältö (kWh)

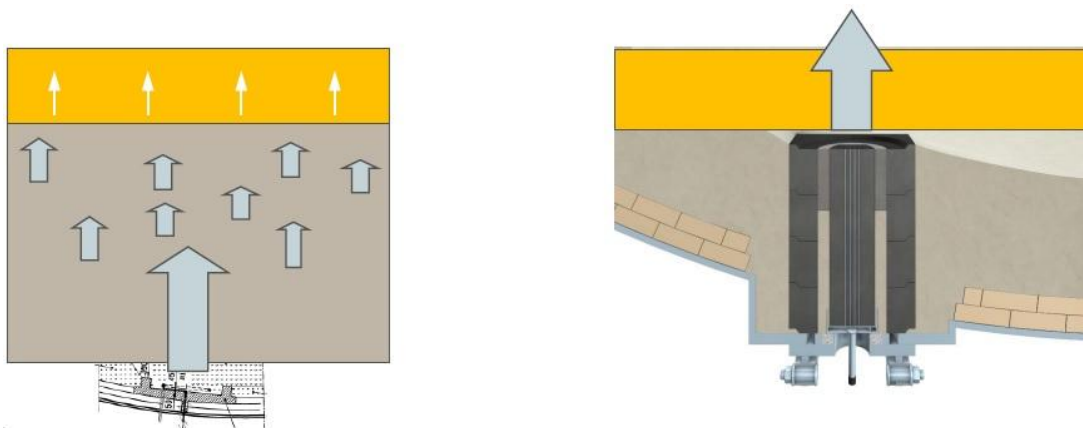
E_{other} = muut lämpöhäviöt (kWh)

Energiankulutukseen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kolmeen eri osa-alueeseen: panosmateriaalien vaikutus, uunin ajopraktiikka ja sulattamiseen käytetty aika. Panosmateriaaleissa suurimmat vaikuttavat tekijät ovat kierrätysterästen kemiallinen koostumus, muoto, tiheys ja laatu. Saantia heikentäviä tekijöitä kierrätysmateriaalissa ovat puu, betoni ja muovi, jotka voivat kuluttaa 10 kWh/t laskettua saantiprosenttia kohti. Uunin ajopraktiikan vaikutus koostuu valokaaren stabiloitumisesta ja sen pituuden optimoinnista sulatuksen eri vaiheissa. Kemiallisen energian hyödyntäminen happilanssauksen aikana ja kaatolämpötilan hallinta ovat tärkeitä kokonaisenergiakulutuksen kannalta. Muita ajopraktiikkaan vaikuttavia tekijöitä ovat kuohuva kuona, ajopraktiikka, elektrodien vesijäähdytys, polttimien hallittu käyttö, uuniin virtaavan vuotoilman minimointi sekä savukaasujen jälkipalamisen hallinta. Prosessihäiriöt ja sulatusten väliset tauot vaikuttavat sulatusaikaan ja sitä myöten kokonaisenergiankulutukseen. (7, s. 56 - 57.)

3.9 Valokaariuunin argon-typpipohjahuuhtelu

3.9.1 Yleistä

Valokaariuunin pohjahuuhtelu ei ole aivan uusi keksintö, vaan ensimmäiset artikkelit ovat jo vuodelta 1990. Pohjahuuhtelun ideana on puhalttaa reagoimatonta kaasua valokaariuunin pohjasta sulaan. Yleisinä kaasuina käytetään typpeä ja argonia. Huuhtelu voidaan toteuttaa kahdella tapaa: suoralla ja epäsuoralla kosketuksella sulaan (kuva 8). Epäsuoralla kosketuksella huuhtelukivet on sijoitettu valokaariuunin pohjalla olevan tulenkestävän materiaalin sisään. Tästä syystä epäsuorassa kosketuksessa olevat huuhtelukivet kestävät noin 5 000 sulatusta, kun taas suorassa kosketuksessa olevat huuhtelukivet kestävät noin 400 - 600 sulatusta. (15.)



KUVA 8. Epäsuora ja suora pohjahuuhtelu (16, s. 5)

Suorakosketuksinen pohjahuuhtelu vaikuttaa pienemmälle alueelle uunissa kuin epäsuora. Kaasu vaikuttaa tehokkaammin, mutta se voi aiheuttaa kuonan siirtymisen pois huuhtelun kohdalta ja näin aiheuttaa sulan kosketuksen ilmakehän kanssa. Tästä voi seurata vedyn ja typen liukeneminen sulaan. (15.)

Pohjahuuhtelun tarkoituksena on saada sekoitettua valokaariuunissa olevaa sulaa terästä sulatuksen loppupuolella. Tämän toimenpiteen myötä sulan konsentraatio- ja lämpötilaerot tasoittuvat. Lämpötilaeron tasoittumisella ja sulan sekoittumisella huonosti lämpöä johtavassa sulassa reaktiot saadaan tapahtumaan jo sulatuksen aikana eikä vasta kaadon yhteydessä. Tämän ansioista riski kaadon aikaiselle kuohumiselle pienenee. Pohjahuuhtelu sekoittaa pohjalla sijaitsevan sulan, jolloin pohjan skollaantuminen hidastuu ja näin ollen sulan saanti paranee. Sulan sekoittumisen ansioista sulaa ei tarvitse lämmittää pinnalta yhtä kauan kuin ennen. Tällöin sulatusaika lyhenee, eikä tarvitse käyttää yhtä paljon energiaa kuin aikaisemmin. Koska sulatusaika on pienempi, valokaarien seinille kohdistuva lämpörasitus vähenee, ja valokaariuunin vuoraukset kestävät enemmän sulatuskertoja. (17.)

Pohjahuuhtelun ansioista koostumuserot tasaantuvat, ja koostumusta on helpompi hallita. Pelkistimet ovat käytössä paremmin koko sulan alueella, ja hapettumisen hallitseminen on helpompaa. Seosaineet sekoittuvat ja liukenevat paremmin, jolloin reaktiot tapahtuvat nopeammin ja koostumuksen hallinta on helpompaa. Pohjahuuhtelun oikealla sijoituksella kaatoaukko pysyy paremmin avoimena, mikä vähentää kaatoaukon avaamiseen kulutettua aikaa. (17.)

magneettiventtiileillä, ja näiden virtausta säädetään ja mitataan termisillä massavirtasäätimillä. Kaasujen paineita valvotaan painelähettimillä. (18, s. 5.)

Ohjauskeskuksena toimii Siemens S7-300:n ohjelmoitava logiikka, jossa on prosessin ohjaukseen liittyvät tulot ja lähdöt, jotka toimivat standardiviestien 4 - 20 mA ja binääristen viestien 24 VDC avulla. Paikallinen operaatiopaneeli on liitetty ethernet-väylällä ohjelmoitavaan logikkaan, ja tämän paneelin kautta pystytään muuttamaan tarvittavia asetuksia ja parametreja (kuva 10). (18, s. 5.)

OHJELMAN ASETUKSET						
Askel	Kaasu	FC401 NI/min	FC402 NI/min	FC403 NI/min	FC404 NI/min	
1	N2	0,0	0,0	0,0	20,0	Käsiajoarvot
2	N2	20,0	30,0	20,0	30,0	Tehot pois perusvirtaus
3	Ar	50,0	55,0	60,0	40,0	Tehot päälle ensimmäinen kori
4	Ar	40,0	44,0	50,0	40,0	Käytetty energia 100 kWh/ton
5	Ar	100,0	120,0	130,0	140,0	Tehot päälle toinen kori
6	N2	120,0	130,0	140,0	150,0	Tehot päälle kolmas kori
7	Ar	150,0	155,0	160,0	170,0	Tehot päälle neliäs kori
8		Sivu 2				Tehot päälle viides kori
9						Käytetty energiaa tot. = 320 kWh/t
10						Kaato
						Kaato ohi, perusvirtaus
		Tiili 1	Tiili 2	Tiili 3	Tiili 4	

KUVA 10. AGA:n pohjahuuhtelun ohjauspaneeli (19, s. 5)

Tuotannon ollessa käynnissä pohjahuuhtelua ohjataan ja valvotaan valokaariuunin valvomosta 2-tason Honeywell automaatiojärjestelmällä, joka on kytketty Profibus-väylän DP/DP-couplerin välityksellä ohjauskeskukseen. (18, s. 5.)

Pohjahuuhtelussa on valittavissa neljä eri huuhteluohjelmaa, joista jokaisessa on kymmenen askelta. Kuvassa 11 on esitelty normaalin sulatuksen askelkaavio. Jokaiseen askeleeseen

pystytään syöttämään jokaiselle huuhtelukivelle omat virtausarvot. Näitä virtausarvon muutoksia pystytään tekemään pelkästään paikalliselta operaatiopaneelilta.

Ohjelmat on jaettu siten, että ne ovat materiaali- ja tasesidonnaisia:

1. 304 ruostumaton teräs, normaali sulatus
2. 304 ruostumaton teräs, tasesulatus
3. 316 haponkestävä, normaali sulatus
4. 316 haponkestävä, tasesulatus (18, s. 7.)



KUVA 11. Normaalisulatukset askelkaavio (18, s. 8)

Järjestelmä on varustettu kahdella hätä-seis-painikkeella, jotka sijaitsevat valvomossa ja venttiilikeskuksen ovelle. Hätä-seis-painiketta painamalla venttiilistön magneettiventtiilien ohjausjännite katkeaa. Pohjahuuhtelun hälytysjärjestelmä ei sisällä lukitsevia hälytyksiä. Järjestelmän hälytykset tulevat valokaariuunin valvomoon, jossa ohjausnäytöltä löytyy kaksi kuittauspainiketta huuhtelukivien kulumiselle ja muille hälytyksille. Hälytykset ovat joko kriittisiä vikahälytyksiä (punainen merkkivalo, joka ei sammuu ennen kuin tilanne on ohi) tai normaali hälytys (keltainen valo), jonka pystyy kuittaamaan. (18, s. 11.)

3.10 Kylkipolttimet

Tuotannon tehostamiseksi valokaariuunin kylkiin, niin sanottuihin "coldspotteihin", joissa kierrätysmateriaali sulaa hitaimmin, on asennettu kolme kylkipoltinta. Kylkipolttimet käyttävät palavaa kaasua (propania, maakaasua) ja happea polttoaineenaan. Kylkipolttimilla on mahdollista suorittaa happilanssausta piin polttamiseksi sulasta. Kylkipolttimien tarkoituksena on

saada sulatettua romupatja tasaisemmin ja nopeammin. Polttimia käytetään kierrätysmateriaalin sulattamiseen sulatuksen alkupuolella ja kierrätysmateriaalin sulettua piin polttamiseen ja lämmön nostamiseen. Takuuehdoiksi kylkipolttimille on asetettu kolmen minuutin tehot päällä - ajan lyhentyminen ja sähköntarpeen vähentyminen 15 kWh/t:lla. (17.)

4 POHJAHUUHTELUN VIRTAAUSARVOJEN TUTKIMINEN JA TAUSTATIEDOT

Pohjahuuhtelun virtausarvojen optimointi on jaettu kolmeen eri tutkimusvaiheeseen projektiaikataulutuksen mukaisesti: tutkimus-, yhteenveto- ja tarkistus- sekä yhteenvetojakssoon (liite 1). Tutkimusjakson tarkoituksena on löytää eri virtausarvoilla suuntaa-antavat tulokset. Yhteenvetojaksolla käytetään hyväksi tutkimusjaksolla saatuja tuloksia, jotta saataisiin stressitestin ajaksi mahdollisimman suuren hyödyn tuovat huuhteluarvot. Tarkistus- ja yhteenvetojaksolla tarkoituksena on todistaa saatujen tulosten paikkansapitävyys ja tehdä tarkentavia testejä.

4.1 Mittausten suorittaminen

Happo- ja rosterilaatujen sulatukset eroavat toisistaan molubdeenipitoisuuden takia, joten näitä sulatuksia verrataan erikseen. Samoja pohjahuuhtelun virtausarvoja pidetään noin viikon ajan, jotta saataisiin mahdollisimman paljon vertailtavia sulatuksia. Kaikki tarvittavat tiedot tallentuvat sulatuskohtaisesti Outokummun tietokantaan, josta SQL-tiedonhakujärjestelmällä tarvittavat tiedot voidaan koostaa Excel-tilukoksi.

4.1.1 Pohjahuuhtelun tavoitteet

Työn tavoitteena on löytää uunin prosessin kannalta optimaaliset virtausarvot. Pohjahuuhtelulla on tarkoitus vähentää kaadon yhteydessä tapahtuvaa kuohuntaa sekä parantaa sulan lämpötilaa, koostumusta ja saantia. Sulan konsentraation ja lämpötilan hallinnalla sulatus nopeutuu, seosaineet sekoittuvat paremmin ja sulatusaika lyhenee. Tällä tavoin kaadosta kaatoon -aika lyhenee ja tuotanto tehostuu.

4.1.2 Mittausvirheiden minimointi

Pohjahuuhtelun virtausarvoja vertaillessa on tärkeä tuntea sulatuksen kulku ja siinä olevat muuttujat. Yhden muuttujan muuttaminen on lähes mahdotonta, koska muuttujia on niin paljon ja niiden hallinta on hyvin haastavaa. Pelkästään lastattavan kierrätysmateriaalin ainepitoisuuksien vaihtelut tuottavat suuren virhemarginaalin. Kemiallisen energian suhteen yhden toimittajan saman erän hajonta piin suhteen voi olla jopa 95 kWh/t per sulatus (liite 2). Kierrätysmateriaalin vaikutus minimoidaan ottamalla huomioon pelkästään saman toimittajan samankaltaisten erien sulatukset. Jotta virhemarginaali olisi mahdollisimman pieni, on mielekästä käyttää

mahdollisimman paljon samankaltaisia sulatuksia. Kierrätysmateriaalin tiheys vaikuttaa sulatusprosessiin, joten tuloksia vertaillessa käytetään pelkästään kahden panoskorin panoksia, mikäli sulatuksia on tehty tarpeeksi.

Valokaariuunin jäähtyminen sulatusten välissä on muuttuva tekijä. On huomattu, että mitä vähemmän on tuotantokatkoksia, sitä vähemmän sähköenergiaa kuluu prosessiin. Uunin eriasteiseen jäähtymiseen voi vaikuttaa esimerkiksi radio-ohjattavan nosturin toiminta, romukorien lastaus ja junan toiminta, seosainejärjestelmän syöttöhäiriöt, uunin massaus, romujen panostuksen kukkuongelmat, holvin väliin jäävät materiaalit ja monet muut asiat. Kuonan koostumus vaihtelee eri sulatuksilla ja voi vaikuttaa esimerkiksi kaadon aikaiseen kuohuntaan, kromipitoisuuteen sekä pelkistymis- ja hapettumisreaktioihin.

Valokaariuunin sulattajia on yhteensä noin 12 eri operaattoria, joiden sulattamistavat eroavat toisistaan. Tämä näkyy kaadon keston, kuohumisen tulkitsemisen, kaatolämpötilan hajonnan ja prosessin muiden toimenpiteiden kestojen vaihteluina, kuten elektrodin vaihdon, kaatoreijän piikkaamisen, tapin puoton tai uunin massaamisen tavoissa.

Näitä kaikkia muuttujia on haastava ottaa huomioon pohjahuuhtelun virtausarvojen vaikutusta analysoidessa. Tästä syystä koetetaan saada mahdollisimman paljon testiajoja, jotta virhemarginaali minimoituisi.

4.1.3 Vertailtavat suureet

Tässä työssä vertailtavat suureet on jaettu neljään eri kategoriaan, jotka ovat konsentraatio, kuohuminen, saanti ja sulatustehokkuus. Kovektiolla mitataan piin ja hiilen suhdetta kromioksidiin kuonassa ($\text{Si}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ ja $\text{C}/\text{Cr}_2\text{O}_3$) sekä kaatolämpötilan hajontaa ($^{\circ}\text{C}$). $\text{Si}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ ja $\text{C}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ -suhdetta on korostettu muuttamalla desimaaliluvut prosenteiksi. Kuohumisessa vertaillaan kuohunta-asteikkoa (1 - 4) ja kaadon kestoa (min). Saannissa otetaan huomioon saantiprosentti ja sen keskihajonta. Opinnäytetyön toimeksiantajan pyynnöstä saantiprosentit on muunnettu indeksiin. Sulatustehokkuudessa huomioidaan tehot päällä -aika (min), kilowattitunnit per tonni (kWh/t) ja kWh/t per kaatolämpötila ($\text{kWh}^{\circ}\text{C/t}$). Kaatolämpötilalla jaetaan kWh/t:t , jotta lämpötila ja sulateräksen paino huomioituu eri sulatuksien välillä. Desimaaliluku $\text{kWh}^{\circ}\text{C/t}$:sta on muunnettu prosenteiksi, jotta erot olisivat helpommin havaittavissa.

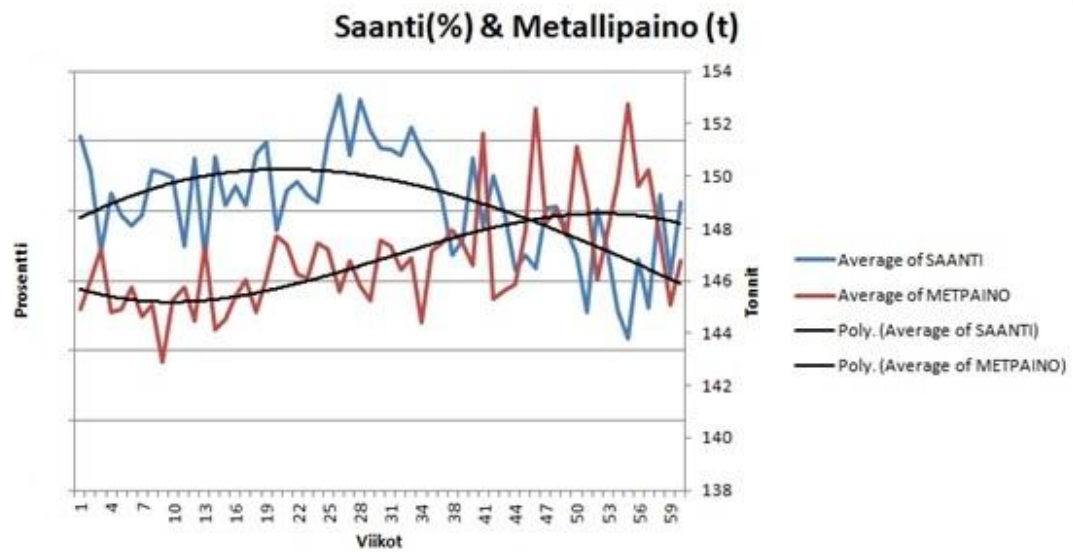
4.2 Pohjahuuhtelun ja kylkipolttimien alustava tarkastelu

Vuoden 2014 kesäseisokin (viikko 37) aikana valokaariuuni 2:lle asennettiin argontyyppipohjahuuhtelu ja kylkipolttimet. Tarkoituksena on tarkastella kylkipolttimien ja pohjahuuhtelun vaikutusta ajalla 1.1.2014 - 10.2.2015. Tarkastelun ajanjaksot on jaettu kolmeen eri jaksoon: ilman laitteita 1.1.2014 - 28.8.2014, kylkipolttimet 7.12.2014 - 19.1.2015 ja pohjahuuhtelu 20.1. - 10.2.2015. Tarkastelusta on jätetty huomioimatta aikaväli 29.8.2014 - 6.12.2014 sulatusprofiilimuutosten, kesäseisokin, uuninvuorauksen heikkouden, pohjahuuhtelun ongelmien ja elektrodibalanssien muutosten takia. Ajanjakso ilman laitteita on vertailulähtökohtana, ennen kuin uudet laitteet asennettiin. Pohjahuuhtelu ei ollut käytössä kylkipoltinajanjaksona materiaalien toimitusongelmien takia, ja tästä syystä saadaan hyvä vertailu siitä, miten kylkipolttimet vaikuttavat ilman pohjahuuhtelua. Pohjahuuhteluajanjaksolla kylkipolttimet ja pohjahuuhtelu olivat käytössä.

4.3 Sulatusten vertailu ja saannin vaikutus analysointeihin

Vertailussa on käytetty pelkästään tasesulatuksia, koska tasesulatuksissa ei käytetä tehtaan sisäistä kierrätysmateriaalia, ja pelkistiminä käytetään pelkästään SiC:a tai FeSi:tä. Lisäksi kromilähteenä käytetään muissa sulatuksissa käytettävää HC4-22:ta ja antrasiittia tasaisempaa HC52:a. Tämän takia materiaalin laatu on tasaisempaa kuin ei-tasesulatuksissa. Analysointien paikkansapitävyyttä ei voida pitää täysin luotettavana, koska eri ajanjaksojen sulatusten määrä vaihtelee huomattavasti. Jaksot ja sulatusten määrät ovat: ilman laitteita 1265, kylkipoltin 202 ja pohjahuuhtelu 111. Sulatusten määrän vaihtelun takia ei ole mielekästä vertailla keskihajontaa.

Pohjahuuhtelun vaikutusta saantiin on hyvin haastavaa vertailla lyhyellä aikavälillä sen suurten heittelyiden takia. Alla olevassa kuvassa 12 on esitetty jo saannin ja metallipainon suhteen vertailu. Mitä heikompi saanti on, sitä enemmän joudutaan kasvattamaan panoksen kokoa. Tästä syystä saannin (sininen viiva) trendline ja metallipainon (punainen viiva) trendline ovat lähes peilikuvia toisistaan.



KUVA 12. Saannin ja metallipainon diagrammi 1.1.2014 - 10.2.2015. Saantiprosenttiluvut piilotettu toimeksiantajan pyynnöstä

5 TUTKIMUSJAKSO M2

Tutkimusjakso M2:lla tutkittiin suuntaa antavasti eri virtausarvojen kautta tapahtuvia vaikutuksia. Tutkimuksilla haettiin analysointien kautta tietoa jatkotutkimustoimenpiteisiin ja yleisesti huomioita pohjahuuhtelun vaikutuksista.

Seuraavissa taulukoissa on eriteltynä ja analysoituna mitattavat suureet eri ajanjaksoilta happo- ja rosterilaatujen osalta. Vihreällä maalatut arvot kuvaavat parhaita arvoja, keltaisella maalatut toiseksi parhaita ja punaisella maalatut heikoimpia arvoja.

5.1 Kouhuminen rosteri- ja happolaaduilla

Kylkipoltinajanjakson aikana kuohunta on ollut aggressiivisinta ja kaato on kestänyt pisimpään molemmilla laaduilla. Rostereiden osalta pohjahuuhtelun aikana kuohunta ja kaadon kesto ovat olleet parhaimpia. Happojen osalta kuohunta on ollut aggressiivisempaa kuin ilman laitteita, mutta kaadon kesto on lyhentynyt lähes minuutin. Tästä voidaan päätellä, että kuohunta on ollut helpommin hallittavissa. Tämän perusteella pohjahuuhtelulla on ollut positiivinen vaikutus kuohumiseen (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Kuohuntaan vaikuttavien tekijöiden vertailu

Rostereiden kuohunta		
	Kuohunta	Kaadon kesto (min)
Ilman laitteita	1.76	8.01
Kylkipoltin	1.81	10.08
Pohjahuuhtelu	1.69	6.83
Happojen kuohunta		
	Kuohunta	Kaadon kesto (min)
Ilman laitteita	1.52	7.56
Kylkipoltin	1.74	8.07
Pohjahuuhtelu	1.70	6.59

5.2 Konvektio rosteri- ja happolaaduilla

Pohjahuuhtelulla on selvä positiivinen vaikutus rostereiden osalta konvektioon (taulukko 3). Kaatolämmön keskihajonnan vertailussa on muistettava otosjoukon suuri keskinäinen vaihtelu, jonka takia tulosten luotettavuus ei ole varmaa. Kylkipolttimilla puolestaan on selvä negatiivinen vaikutus happojen osalta tapahtuvaan sekoittumiseen, mutta selvää eroa pohjahuuhtelun ja ilman laitteita -jakson väliseen vertailuun ei ole.

TAULUKKO 3. Konvektion vertailu

Rostereiden konvektio			
	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Kaatol. keskihajonta
Ilman laitteita	2.53 %	15.58 %	29.19
Kylkipoltin	1.21 %	11.22 %	29.11
Pohjahuuhtelu	1.12 %	8.18 %	32.95
Happojen konvektio			
	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Kaatol. keskihajonta
Ilman laitteita	1.30 %	9.08 %	34.50
Kylkipoltin	2.01 %	14.57 %	30.77
Pohjahuuhtelu	1.27 %	10.49 %	29.29

5.3 Sulatusnopeus rosteri- ja happolaaduilla

Uusien laitteiden tultua käyttöön sulatusprosessi on tehostunut. Rostereiden osalta pohjahuuhtelun mukanaolo on tuottanut positiivisimman tuloksen, kun taas happojen osalta parhaat tulokset ovat tulleet pelkkien kylkipolttimien avulla (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Sulatusnopeuden vertailu

Rostereiden sulatusnopeus			
	Tehot päällä (min)	kWh/t	kWh/t/Kaatol.
Ilman laitteita	52.91	448.39	28.65 %
Kylkipoltin	49.91	415.57	26.13 %
Pohjahuuhtelu	49.13	413.19	26.02 %
Happojen sulatusnopeus			
	Tehot päällä (min)	kWh/t	kWh/t/Kaatol.
Ilman laitteita	52.04	441.44	28.08 %
Kylkipoltin	48.44	409.42	25.46 %
Pohjahuuhtelu	48.74	418.02	26.05 %

On muistettava, etteivät tulokset ole välttämättä vertailukelpoisia keskenään keskihajonnan vertailussa otosjoukon koon takia. Kuten luvussa 4.2.1 mainittiin, saannilla on jo pitemmän ajan ollut laskeva trendi, joten ei ole mielekästä vetää hätäisiä johtopäätöksiä saannin heikkenemisestä. Rostereilla on tosin havaittavissa saannin parantumista toisin kuin happolaaduilla (taulukko 5).

TAULUKKO 5. Saannin vertailu. Saantiprosentti muunnettu indeksiin

Rostereiden saanti		
	Saanti (%)	Saannin keskihajonta
Ilman laitteita	157.54	3.57
Kylkipoltin	151.32	4.07
Pohjahuuhtelu	154.09	4.04
Happojen saanti		
	Saanti (%)	Saannin keskihajonta
Ilman laitteita	158.13	4.32
Kylkipoltin	153.54	3.20
Pohjahuuhtelu	152.81	4.11

5.4 Pohjahuuhtelun virtausarvojen analysointi M2

Kierrätysmateriaalin laadun epävarmuus ja vaihtelu on suurin muuttuja valokaariuunin prosessissa, kuten luvussa 4.1.2 on mainittu. Tämä minimoidaan vertailemalla eri toimittajien ainepitoisuuksia keskenään. Liitteessä kolme on vertailtu eri toimittajien saannin, kromin, nikkelin

ja piin pitoisuuksia, jotta löydettäisiin vertailukelpoiset erät ja siten mahdollisimman samankaltaiset sulatukset.

5.4.1 Rosterilaadun virtausarvojen analysointi

Tutkimusjaksolla M2 käytettiin virtausarvoja 40 l/min, 100 l/min, nousevasti 40 - 100 l/min ja laskevasti 100 - 40 l/min (liite 4). Nousevilla virtausarvoilla haettiin konvektion parantumista ja laskevilla virtausarvoilla sulatuksen nopeuttamista. Tuloksissa on otettu huomioon kolmen eri toimittajan kierrätysteräs. Kahden toimittajan erät muistuttivat paljon toisiaan (toimittaja 2 ja 3), joten ne on huomioitu samassa taulukossa ja toimittaja 4:n kierrätysteräs omanaan. Tuloksissa on huomioitu pelkästään kahden korin panokset, jotta materiaalin tiheys olisi mahdollisimman samanlainen. Tulosten värit on eroteltu järjestyksessä parhaasta huonoimpaan: vihreä, keltainen, oranssi ja punainen (taulukot 6 ja 7).

TAULUKKO 6. Toimittaja 2:n ja 3:n virtausarvojen vertailu. Saantiprosentti muunnettu indeksiin

Virtausarvot	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Tehot päällä (min)
40 l/min	1.00	5.00	0.90 %	9.80 %	51.33
100 l/min	1.74	9.42	1.00 %	8.60 %	51.00
40 - 100 l/min	1.68	8.28	0.60 %	6.50 %	48.64
100 - 40 l/min	1.34	7.41	1.00 %	10.10 %	48.80

kWh/t	Saanti (%)	Saannin keskihajonta	TTT	Keskihajonta kaatol.	Sulatusten lkm
435.36	152.44	2.05	131.00	29.74	3
421.40	148.84	4.10	123.53	25.31	19
414.96	149.77	3.07	84.92	21.37	25
410.12	153.13	4.20	83.54	29.35	41

TAULUKKO 7. Toimittaja 4:n virtausarvojen vertailu. Saantiprosentti muunnettu indeksiin

Virtausarvot	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Tehot päällä (min)
40 l/min	1.33	4.17	0.90 %	7.10 %	48.00
100 l/min	1.45	7.18	0.70 %	9.80 %	50.18
40 - 100 l/min	1.36	9.09	0.40 %	9.70 %	51.27
100 - 40 l/min	TESTEJÄ EI OLE TEHTY				
kWh/t	Saanti (%)	Keskihajonta saanti	TTT	Keskihajonta kaatol.	Sulatusten lkm
411.86	143.94	2.70	66.67	12.50	6
417.37	157.25	4.49	81.09	22.63	11
428.82	152.88	2.06	77.73	18.91	11
TESTEJÄ EI OLE TEHTY					0

Sulan tasaisuudesta kertoo kaatolämpötilan keskihajonta sekä piin ja hiilen suhde kromioksidiin. Parhaimmat arvot saatiin 100 l/min ja nousevalla 40 - 100 l/min virtausarvoilla. Voidaan olettaa, että mitä suuremmat virtausarvot sulatuksen loppupuolella on, sitä paremmin sula on sekoittunut (taulukko 6).

Kuohunnan ja kaadon keston vertailussa kaato on sitä helpompi suorittaa, mitä pienemmät virtausarvot sulatuksen loppupuolella on. Tämä voi aiheutua siitä, että suuret virtausarvot kiihdyttävät reaktioita sulassa ennen kaatoa, jolloin kaadon aikana tapahtuvat reaktiot ovat rajumpia (taulukko 6).

Tehot päällä -ajassa on huomattavia eroja kahden eri kohderyhmän sulatuksissa. Virtausarvolla 40 l/min otoksia on hyvin vähän, ja tämä heikentää vertailukelpoisuutta (taulukko 6). Tehot päällä -aikaan vaikuttavat huomattavasti uunin lämpötila ja tuotatokatkokset, jolloin uuni kerkeää jäähtymään. Hätäisiä johtopäätöksiä ei kannata tehdä.

Saannin suhteen on huomattavissa samanlaista heittoa kuin tehot päällä -ajassakin. Nämä kaksi kohderyhmää eroavat toisistaan hyvin paljon, joten tästäkään ei ole mielekästä vetää johtopäätöksiä (taulukko 6). Stressitestien jälkeen tullaan suorittamaan virtausarvolla 40 l/min lisää sulatuksia. Lisäksi tehdään tarkentavia koeajoja saman toimittajan tasesulatuksilla käyttäen eri virtausarvoja. Näillä toimilla on tarkoitus todistaa johtopäätökset oikeaksi tai vääriksi.

5.4.2 Happolaadun virtausarvojen analysointi

Happolaatujen kierrätysmateriaalin toimittajia oli yhteensä kolme. Liitteessä 3 on nähtävissä eri toimittajien ainepitoisuuksien erot. Kahden korin ja saman toimittajien sulatukset jäivät erittäin vähäisiksi, joten johtopäätöksiä ei tehdä. Taulukossa 8 tulosten värit on eroteltu järjestyksessä parhaasta huonoimpaan: vihreä, keltainen, oranssi.

TAULUKKO 8. Happolaatujen virtausarvojen vertailu materiaalin perusteella. Saantiprosentti muunnettu indeksiin

Virtausarvot	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Tehot päällä (min)
40 l/min	4.00	6.00	1.36 %	14.12 %	55.00
100 l/min	TESTEJÄ EI OLE TEHTY				
40 - 100 l/min	2.80	13.80	0.57 %	5.61 %	54.20
100 - 40 l/min	1.70	7.60	0.44 %	7.18 %	48.90

kWh/t	Saanti (%)	Keskihajonta saanti	TTT	Keskihajonta kaatol	Sulatusten lkm
445.59	148.55	5.48	79.67	17.50	3
TESTEJÄ EI OLE TEHTY					0
436.56	149.73	4.67	88.40	18.19	5
404.59	151.49	2.02	79.90	36.64	10

Happolaatujen otosjoukkoa on pakko suurentaa, joten tarkasteluun otetaan yhden korin panokset, tase- ja ei-tasesulatukset (taulukko 9).

TAULUKKO 9. Happolaatujen virtausarvojen vertailu. Saantiprosentti muunnettu indeksiin

Virtausarvot	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Tehot päällä (min)
40 l/min	1.67	13.67	1.30 %	11.50 %	54.67
100 l/min	1.73	6.73	0.80 %	6.80 %	48.82
40 - 100 l/min	1.96	11.20	0.60 %	10.20 %	51.48
100 - 40 l/min	1.84	7.26	1.30 %	8.60 %	46.74

kWh/t	Saanti (%)	Keskihajonta saanti	TTT	Keskihajonta kaatol	Sulatusten lkm
466.48	154.04	5.62	114.83	35.23	6
431.08	151.95	5.13	80.09	25.44	11
444.82	148.99	5.13	81.08	26.00	25
427.11	154.40	6.78	65.00	22.85	19

Sula on sitä tasalaatuisempi kaatolämpötilan keskihajonnan ja pii- ja hiilikromioksidisuhteen mukaan, mitä enemmän kaasua syötetään sulatuksen alkupuolella. Kaadon kesto on myös reilusti pienempi, kun virtausarvot sulatuksen alussa ovat suuremmat. Myös tehot päällä -aika on pienempi niillä sulilla, joiden virtausarvot ovat suurempia sulatuksen alussa (taulukko 9).

Saanti on parasta laskevilla virtausarvoilla ja 40 l/min virtausarvolla. Tosin otosjoukko on hyvin pieni (6 kpl) verrattuna muihin virtausarvoihin. Tarkempien johtopäätösten tekemiseksi on tehtävä 40 l/min virtausarvolla lisää testauksia (taulukko 9). Kierrätysmateriaalin ainepitoisuuksien vaihteluita ei ole otettu huomioon taulukossa, joten tuloksiin on suhtauduttava hyvin varauksellisesti.

6 YHTEENVETOJAKSO M3

Yhteenvetojakso M3 sijoittuu stressitestien ajalle, minkä takia pohjahuuhtelulle haetaan mahdollisimman tehokkaita virtausarvoja. Stressitestien ensimmäisen viikon aikana havaittiin valokaariuunin tehokkuudessa puutteita, joten päätettiin nostaa jänniteporrasta 16:sta 17:ään. Jänniteportaan muutoksen takia kaikki testit eivät ole vertailukelpoisia keskenään, mistä syystä tuloksia tarkasteltaessa on muistettava kriittisyys.

Valokaariuunin saantiprosentti on ollut hyvin alhainen tutkimusjakson M2 aikana, joten tehtäväksi on tullut löytää parhaat virtausarvot saantiprosentin nostamiseksi. Tutkimusjakson M2 aikana parhaat arvot saantiin nähden tulivat virtausarvolla 40 l/min, mutta koska otosjoukko oli vain 3 sulatusta, ei ole mielekästä uskoa tuloksiin. Toiseksi parhaat tulokset saatiin laskevalla virtausarvolla 100 - 40 l/min, jolloin otosjoukkona oli 41 sulatusta. Näistä tuloksista tehtyjen päätelmien perusteella alettiin testata laskevia arvoja 150 - 40 l/min ja 120 - 60 l/min.

Kierrätysmateriaalien ainepitoisuuksien tiedot päivittyvät takautuvasti tietokantoihin tasetestien ja romupihalla tehtyjen mittausten perusteella. Tämän takia eri virtausnopeuksia lisäinformaatio tulee hieman myöhässä, minkä vuoksi tutkimusjaksojen tulosten lukumäärässä on heittoa.

Yhteenvetojakson M3 aikana pidetyssä palaverissa todettiin, että kaatolämpötilan vaikutus energian käyttöön tulisi ottaa huomioon. Sulatukseen käytetty energia huomiodaan kWh/t:ina, mutta tämä ei huomioi sitä, kuinka kuumaksi sula lämmitetään. Kaatolämpötila otetaan huomioon jakamalla kWh/t:t kaatolämpötilalla, jolloin saadaan poistettua sulan lämpötilaerojen vaikutus. Saatu desimaaliluku muunnetaan prosenteiksi, jotta erot olisivat helpommin huomattavissa.

6.1 Kierrätysmateriaalin toimittajat

Kierrätysmateriaalien toimittajista tasalaatuisinta ja eniten käytettyä romua on tullut toimittaja 3:lta. Analysointien takia on viisasta käyttää saman toimittajan samankaltaisia kierrätysmateriaalieriä, jotta ainepitoisuuksien vaihtelu saataisiin minimoitua. Kuvassa 13 on esitetty aikavälin 20.1. - 25.2.2015 eri kierrätysmateriaalin toimittajien sulatukset suodatettuna kahden korin panostuksiin eri virtausarvoilla. Lisäksi huomioon on otettu pelkästään yli 90 tonnia samaa erää panostetut kierrätysmateriaalit. Vasemmassa laidassa näkyvät toimittajat, ylärivissä

virtausarvot 1 - 6 ja taulukon sisällä toimittajien sulatusten määrä. Vihreällä laatikolla on korostettu analysointeihin valitut toimittajat.

Virtausarvot 1 - 6 on jaettu seuraavanlaisesti:

1. 40 l/min
2. 100 l/min
3. 40 - 100 l/min
4. 100 - 40 l/min
5. 150 - 40 l/min
6. 120 - 60 l/min

LAATURYHMÄ	RU						
KORILKM	2						
ERÄ	(All)						
Count of SULNRO		Column Labels					
Row Labels		1	2	3	4	5	6 Grand Total
Toimittaja 1		12			21		33
Toimittaja 2					11		11
Toimittaja 3		4	21	26	17	61	23 152
Toimittaja 4		6	11	10		15	42
Toimittaja 5				1	34		35
MUU				22	1		23
Grand Total		22	32	59	84	61	38 296

LAATURYHMÄ	HA						
KORILKM	2						
ERÄ	(Multiple Items)						
Count of SULNRO		Column Labels					
Row Labels		1	2	3	4	5	6 Grand Total
Toimittaja 1					1		1
Toimittaja 2					6	6	12
Toimittaja 3		4	4	5	16	2	31
Grand Total		4	4	5	7	22	2 44

KUVA 13. Haplo- ja rosterilaatujen toimittajien sulatusten määrä eri virtausarvoilla

Valittujen kierrätysmateriaalitoimittajien erät tarkastellaan erikseen, jotta erien ainepitoisuudet eivät poikkeaisi toisistaan merkittävästi. Mukana tarkastelussa on saantiprosentti ja kromin, nikkelin ja piin ainepitoisuudet. Kuvassa 14 on esitetty rosterilaadun toimittajan erien keskimääräiset ainepitoisuudet ja niiden keskihajonnat.

LAATURYHMÄ	RU									
TOIMITTAJA	ELG JEWOMETAAL									

KUVA 14. Rosterilaadun kierrätysmateriaalin erien ainepitoisuuksien keskiarvot ja keskihajonnat

Happolaatujen kierrätysmateriaalin erien vaihtelut ovat paljon suurempia kuin rosterilaaduilla. Pienemmän sulatusmäärän takia on pakko ottaa huomioon suuretkin ainepitoisuuden vaihtelut kierrätysmateriaalierien välillä. Analysointeja tehtäessä on kuitenkin muistettava kriittinen tarkastelu, jotta ei tehtäisi virheellisiä arvioita. Kuvassa 15 on esitetty happolaatujen erien ainepitoisuuksien keskiarvot ja keskihajonnat. Punaisella maalatut arvot ovat merkittävästi poikkeavia pitoisuuksia, joita ei oteta huomioon analysoinneissa.

LAATURYHMA	HA									
TOIMITTAJA	(All)									
Row Labels	Average of SAANTI2	Average of SAANTI_STDDEV	Average of CR	Average of CR_STDDEV	Average of NI	Average of NI_STDDEV	Average of SI	Average of SI_STDDEV	Count of SULNRO	
0000010984	0.947	0.007	15.733	0.197	7.770	0.425	0.888	0.288	3.000	
0000010985	0.948	0.005	16.078	0.257	10.468	1.158	0.512	0.099	7.000	
0000010986	0.950	0.001	16.600	0.103	9.246	0.257	0.629	0.040	3.000	
0000010995	0.943	0.005	15.645	0.240	10.369	0.453	0.585	0.245	29.000	
0000011006	0.953	0.002	15.739	0.222	7.837	0.153	0.603	0.074	4.000	
0000011010	0.951	0.002	16.670	0.613	7.833	0.188	0.641	0.115	10.000	
0000011023	0.949	0.002	15.958	0.462	7.945	0.264	0.620	0.054	4.000	
0000011025	0.944	0.001	16.124	0.224	10.164	0.230	0.701	0.100	12.000	
0000011033	0.951	0.007	16.063	0.475	7.850	0.451	0.679	0.212	4.000	
0000011034	0.951	0.001	16.401	0.480	9.584	0.132	0.828	0.141	10.000	
0000011037	0.954	0.001	15.500	0.548	7.751	0.370	0.526	0.086	4.000	
0000011038	0.957	0.003	15.978	0.302	8.534	0.288	0.587	0.172	17.000	
0000011046	0.956	0.002	15.798	0.370	7.701	0.180	0.640	0.144	11.000	
0000011060	0.952	0.004	15.768	0.497	7.544	0.742	0.621	0.183	2.000	
0000011065	0.949	0.003	16.780	0.322	10.000	0.382	0.712	0.060	8.000	
0000011072	0.952	0.003	16.318	0.304	8.223	0.180	0.780	0.109	1.000	
0000011073	0.940	0.003	16.916	0.616	10.004	0.469	1.018	0.136	35.000	
Grand Total	0.947	0.003	16.220	0.395	9.329	0.379	0.721	0.149	164.000	

KUVA 15. Happolaadun kierrätysmateriaalin erien ainepitoisuuksien keskiarvot ja keskihajonnat

6.2 Virtausarvojen analysointia rosteri- ja happolaaduilla M3

Analysoineissa on otettu huomioon luvussa 6.1. valitut kierrätysmateriaalierät ajanjaksolta 20.1. - 25.2.2015. Analysoinnit on jaettu neljään eri kategoriaan: kuuhunta, konvektio, sulatusnopeus ja

saanti. Tulokset on korostettu maalaamalla laatikot parhaimmasta huonoimpaan värein vihreä, keltainen ja punainen.

6.2.1 Kuohuminen rosterilaaduilla

Rosterilaaduilla kuohuminen on ollut asteikoilla 1 - 4 vähäisintä arvoilla 150 - 40 l/min ja 100 l/min (taulukko 10). Kuohunta on ollut aggressiivisempaa arvoilla 40 l/min ja 120 - 60 l/min. Tuloksissa on huomioitava virtausarvolla 40 l/min vähäinen sulatusten määrä. Sulan kaato on suoriutunut nopeiten virtausarvoilla 40 l/min ja 150 - 40 l/min. Kolmanneksi parhaat arvot ovat tulleet arvolla 100 l/min, joten tämä ei tue tutkimusjaksolla M2 luvussa 5.5.1 tehtyä johtopäätöstä: ”Tämä voi aiheutua siitä, että suuret virtausarvot kiihdyttävät reaktioita sulassa ennen kaatoa, jolloin kaadon aikana tapahtuvat reaktiot ovat rajumpia.”

TAULUKKO 10. Kuohuminen eri virtausarvoilla

l/min	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)	Sulatusten lkm
40	2.000	5.400	5
100	1.467	6.200	15
40 -100	1.550	7.300	20
100 - 40	1.848	6.333	33
150 - 40	1.538	6.077	13
120 - 60	1.935	7.520	46

6.2.2 Konvektio rosterilaaduilla

Nousevilla virtausarvoilla oletuksena oli, että sulan metallurgiset ominaisuudet parantuisivat, eli sula sekottuisi paremmin. Kuten seuraavalla sivulla olevassa taulukossa 11 on esitetty, ylivoimaisesti parhaimmat tulokset on saatu arvoilla 40 - 100 l/min, joten konvektion parantuminen nousevilla arvoilla näyttäisi pitävän paikkansa. Seuraavalla tutkimusjaksolla tehdään lisää testejä nousevilla virtausarvoilla johtopäätöksen todistamiseksi. Kaatolämpötilan keskihajontaa ei ole mielekästä huomioida operaattorikohtaisten sulatustapojen eroavaisuuksien takia.

TAULUKKO 11. Sekoittuminen eri virtausarvoilla

I/min	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Kaatol. Keskihajonta	Sulatusten lkm
40	2.8 %	16.5 %	21.927	5
100	1.1 %	11.4 %	21.708	15
40 - 100	0.6 %	4.2 %	41.973	20
100 - 40	1.7 %	12.9 %	32.085	33
150 - 40	0.9 %	9.6 %	43.070	13
120 - 60	1.0 %	9.2 %	31.078	46

6.2.3 Sulatusnopeus rosterilaaduilla

Laskevillä virtausarvoilla oli oletuksena sulatuksen nopeutuminen, ja tämä näyttäisi pitävän paikkansa (taulukko 12). Parhaimat arvot kWh/t per kaatolämpötila on saatu virtausarvoilla 150 - 40 l/min ja 120 - 60 l/min. Virtausnopeuden 100 - 40 l/min aikana jänniteporrasta nostettiin 16:sta 17:ään, joten tätä ennen tehdyt testit eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään.

TAULUKKO 12. Sulatusnopeus eri virtausarvoilla

I/min	Tehot päällä (min)	kWh/t	kWh/t : Kaatol	Sulatusten lkm
40	49.200	414.368	25.5 %	5
100	48.667	409.841	25.6 %	15
40 - 100	49.600	404.244	26.4 %	20
100 - 40	48.818	418.725	26.0 %	33
150 - 40	47.077	409.922	25.3 %	13
120 - 60	47.848	407.323	25.3 %	46

6.2.4 Saanti rosterilaaduilla

Laskevillä virtausarvoilla saantiprosentti on selvästi parempi kuin nousevilla. Stressitestien takia on tehty pelkästään yksi nousevilla virtausarvoilla toteutettu testijakso. Virtausarvoa 40 l/min ei ole syytä huomioida pienen otoskoon takia (taulukko 13). Seuraavalla tutkimusjaksolla tehdään testejä nousevilla virtausarvoilla, jolloin todistetaan johtopäätöksen totuudenmukaisuus.

TAULUKKO 13. Saanti eri virtausarvoilla. Saantiprosentti muunnettu indeksiin

I/min	Saanti (%)	Saannin keskihajonta	Sulatusten lkm
40	154.87	2.58	5
100	156.13	4.10	15
40 - 100	146.44	2.68	20
100 - 40	156.63	2.76	33
150 - 40	154.69	2.96	13
120 - 60	154.36	2.91	46

6.2.5 Happolaadun virtausnopeuksien analysointi

Happolaatuja tuotetaan paljon vähemmän kuin rosterilaatuja. Tästä syystä testiotoksiakin on hyvin paljon vähemmän. Otosmäärien vaihtuvuuden ja vähyyden takia ei ole mielekästä vertailla tuloksia keskenään. Ainoat virtausnopeudet, joita on mielekästä vertailla keskenään, ovat 40 - 100 l/min ja 100 - 40 l/min. Näitä rostereihin vertailtaessa voi huomata samankaltaista suuntautumista (taulukot 14 - 17). Happolaatujen kuohunta, sulatusnopeus ja saanti käyttäytyvät nousevilla ja laskevilla arvoilla samantapaisesti kuin rosterilaaduilla. Sekoittumisen osalta tilanne on päinvastainen – rostereiden sekoittuminen oli selvästi parempaa nousevilla virtausarvoilla, kun taas happolaaduilla ei ole huomattavissa suurta poikkeavuutta keskenään (taulukko 11).

TAULUKKO 14. Kuohuminen eri virtausarvoilla

I/min	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)	Sulatusten lkm
40	1.714	12.286	7
100	1.727	6.727	11
40 - 100	1.958	11.500	24
100 - 40	1.842	7.263	19
150 - 40	1.250	22.250	4
120 - 60	1.333	8.667	6

TAULUKKO 15. Konvektio eri virtausarvoilla

I/min	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Kaatol. Keskihajonta	Sulatusten lkm
40	1.0 %	10.2 %	37.890	7
100	1.1 %	9.3 %	25.441	11
40 - 100	0.9 %	14.8 %	24.605	24
100 - 40	1.5 %	10.3 %	22.851	19
150 - 40	1.3 %	12.1 %	26.998	4
120 - 60	2.1 %	14.7 %	44.195	6

TAULUKKO 16. Sulatusnopeus eri virtausarvoilla

I/min	Tehot päällä (min)	kWh/t	kWh/t : Kaatol	Sulatusten lkm
40	54.429	464.321	29.0 %	7
100	48.818	431.081	26.8 %	11
40 - 100	51.417	444.547	27.9 %	24
100 - 40	46.737	427.107	26.9 %	19
150 - 40	46.000	420.980	26.7 %	4
120 - 60	50.667	441.230	27.9 %	6

TAULUKKO 17. Saanti eri virtausarvoilla. Saantiprosentti muunnettu indeksiin

I/min	Saanti (%)	Saannin keskihajonta	Sulatusten lkm
40	152.83	5.47	7
100	151.95	5.13	11
40 - 100	149.14	5.21	24
100 - 40	154.40	6.78	19
150 - 40	152.56	2.68	4
120 - 60	151.00	5.42	6

Happolaatujen sulatusten määrän vähyyden takia on syytä miettiä erilaista sulatusjakoa kuin toimittajan mukaan tehtävä. Tämän takia yhteenvetojakson M3 aikana pidetyssä palaverissa päädyttiin jakamaan happolaadut lisätyn molybdeenipitoisuuden mukaan. Tämä kuitenkin vähentää analysoinnin luotettavuutta, koska kierrätysmateriaalin pitoisuudet vaihtelevat erittäin paljon keskenään.

7 TARKISTUS- JA YHTEENVETOJAKSO M4

Tarkistus- ja yhteenvetojaksen aikana on tarkoitus todistaa analysoinnit paikkansapitäviksi sekä tehdä tarkentavia tasesulatustestejä. Stressitestien aikana pidettiin oletetusti mahdollisimman hyvät virtausarvot saannin suhteen, ja tämän takia virtausarvolla 40 l/min otokset jäivät varsin vähäisiksi. Tämän tutkimusjakson aikana suoritetaan kyseisellä virtausnopeudella lisää testejä sekä tutkitaan vaikutuksia virtausarvoilla 60 - 120 l/min ja 160 l/min. Uusintatestejä tulosten varmistamiseksi tehdään virtausarvoilla 40 - 100 l/min ja 100 - 40 l/min. Pitkien taseputkien aikana suoritetaan testejä arvoilla 300 l/min, 160 l/min ja 40 l/min, jotta sulatukset olisivat kaikin puolin vertailukelpoisia.

Tämän tutkimusjakson aikana kylkipolttimille suoritetaan myös erinäisiä testejä, joilla on vaikutus sulatusten analysointiin. Tasetestien aikana kylkipolttimille ei tehdä eri säätöjä, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Tutkimusjakson aikana tutkitaan myös pohjahuuhtelukivien sekä uunin pohjan kulumista ja siihen vaikuttavia asioita.

7.1 Ei-tasetetit

Yhteenveto- ja tarkistusjaksolla M4 analysoitiin toimittaja 3:n kierrätysmateriaalia, jota oli panostettu valokaariuuniin yli 90 tonnia. Analysoinneissa on myös otettu huomioon pelkästään kahden korin panostukset eikä ole huomioitu sulatuksia, joissa on yli 25 minuutin kaatoaika. Happolaatuja on valmistettu rostereihin verrattuna vähän, joten niistä on huomioitu ne yhden korin sulatukset, joihin on lisätty kaksi tonnia molybdeenia.

7.1.1 Kuohuminen rosterilaaduilla

Kuohumisen ja virtausarvojen välillä ei näytä olevan yhteyttä. Todennäköisesti prosessin muuttuvat tekijät hukkaavat pohjahuuhtelun vaikutuksen kuohumisen suhteen (taulukko 18).

TAULUKKO 18. Kuohuminen eri virtausarvoilla

Virtausarvot (l/min)	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)	Sulatusten lkm.
40	1.50	7.39	28
100	1.58	8.05	19
40 - 100	1.85	8.18	40
100 - 40	1.54	5.23	13
150 - 40	1.67	8.75	30
120 - 60	2.06	7.82	51
160	2.24	9.20	25
60 - 120	2.13	6.13	15

7.1.2 Konvektio rosterilaaduilla

Konvektion osalta parhaimmat virtausarvot ovat olleet nousevalla 40 - 100 l/min ja laskevalla arvolla 100 - 40 l/min. Oletuksena oli, että nousevilla arvoilla sekoittuminen olisi parempaa ja laskevilla heikompaa, mikä ei näytä pitävän paikkansa. Kylkipoltintestit ovat olleet stressitestien aikana käytössä, joten tämä voi sekoittaa tulosten näkyvyyttä eri virtausarvoilla (taulukko 19).

TAULUKKO 19. Konvektio rosterilaaduilla

Virtausarvot (l/min)	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Kaatol. Keskihajonta	Sulatusten lkm.
40	2.52 %	14.36 %	27.26	28
100	0.92 %	8.50 %	26.59	19
40 - 100	0.87 %	8.97 %	24.85	40
100 - 40	0.82 %	9.82 %	26.19	13
150 - 40	0.69 %	9.30 %	34.48	30
120 - 60	1.38 %	11.41 %	33.82	51
160	1.64 %	10.58 %	38.84	25
60 - 120	2.43 %	15.55 %	28.92	15

7.1.3 Sulatusnopeus rosterilaaduilla

Selvästi nopeimmin ja tehokkaimmin sulatus on tapahtunut nousevalla virtausarvolla 60 - 120 l/min ja toiseksi parhaat tulokset laskevalla 100 - 40 l/min. Tämän voivat selittää kylkipoltintestit, joita suoritettiin tänä aikana, sekä romujen kuivaamiseen käytetty aika. Lisäksi on huomattu, että uunin vaihdon jälkeen ensimmäisen vuorokauden aikana uunin prosessi on toiminut

tehokkaammin kuin jälkeenpäin. Tämä voi selittää sen, minkä takia juuri näillä arvoilla tulokset ovat niin hyvät (taulukko 20).

TAULUKKO 20. Sulatusnopeus rosterilaaduilla

Virtausarvot (l/min)	Tehot päällä (min)	kWh/t	kWh/t/Kaatol.	Sulatusten lkm.
40	49.18	408.94	26.45 %	28
100	50.58	419.45	27.67 %	19
40 - 100	46.80	413.18	25.81 %	40
100 - 40	46.69	407.83	25.16 %	13
150 - 40	50.23	420.96	26.17 %	30
120 - 60	47.33	411.44	26.52 %	51
160	47.20	407.48	25.59 %	25
60 - 120	44.00	389.63	24.52 %	15

7.1.4 Saanti rosterilaaduilla

Valokaariuunin saanti on ollut parasta nousevalla 60 - 120 l/min ja laskevalla virtausarvolla 120 - 60 l/min. Heikointa puolestaan virtausarvoilla 100 l/min ja 100 - 40 l/min. Näistä ei pysty vetämään johtopäätöksiä (taulukko 21).

TAULUKKO 21. Saanti eri virtausnopeuksilla rosterilaaduilla. Saantiprosentti muunneltu indeksiin

Virtausarvot (l/min)	Saanti (%)	Saannin keskihajonta (%)	Sulatusten lkm.
40	153.62	3.01	28
100	148.64	3.82	19
40 - 100	152.10	3.50	40
100 - 40	151.09	5.11	13
150 - 40	151.59	3.73	30
120 - 60	154.74	3.30	51
160	152.62	2.97	25
60 - 120	155.13	2.62	15

7.1.5 Virtausarvojen analysointi happolaaduilla

Happolaatuja on valmistettu liian vähän, jotta voitaisiin tehdä analysointeja eri virtausarvojen vaikutuksista. Taulukossa 22 on nähtävissä sulatusten tulokset. Yhteenvetojaksolla M3 oli

kuitenkin huomattavissa samankaltaista käyttäytymistä samoilla virtausarvoilla kuin rosterilaaduilla. Happolaaduille olisi mielekäästä tehdä tasetestejä, jolloin olisi helpompi huomata virtausarvojen vaikutusten erot.

TAULUKKO 22. Happolaatujen tulokset eri virtausarvoilla. Saantiprosentti muunnettu indeksiin

Virtausarvot (l/min)	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)	Si/Cr2O3	C/Cr2O3	Kaatol. Keskihajonta
40	1.33	8.17	4.10 %	18.53 %	21.57
100	3.00	5.67	2.52 %	14.68 %	23.39
40 -100	1.83	10.34	0.86 %	14.84 %	29.92
100 - 40	2.29	6.57	0.88 %	9.01 %	21.55
150 - 40	1.00	13.00	1.49 %	11.41 %	31.64
120 - 60	1.22	5.89	1.61 %	18.57 %	27.66
160	2.31	8.08	3.40 %	19.48 %	29.70
60 - 120	2.17	7.33	1.18 %	8.56 %	26.96

Tehot päällä (min)	kWh/t	kWh/t/Kaatol.	Saanti (%)	Saannin keskihajonta (%)	Sulatusten lkm.
48.00	418.89	26.03 %	151.42	5.49	6
52.67	452.24	28.41 %	142.86	1.56	3
49.00	435.48	28.29 %	148.75	7.68	29
46.00	422.42	26.56 %	155.92	2.79	7
45.00	410.20	25.93 %	152.83	3.27	3
47.44	418.48	25.81 %	155.80	2.57	9
45.46	416.79	26.04 %	153.06	4.80	13
44.58	410.17	25.60 %	150.75	4.09	12

7.2 Tasetestit

Tasetestit yksi ja kaksi suoritettiin toimittaja 3:n rosteritasesulatuksista. Tasesulatustestien tarkoituksena oli minimoida muuttujat materiaalinlaadun ainepitoisuuksien osalta, jotta nähtäisiin, minkälaiset vaikutukset virtausarvoilla todellisuudessa on. Tasetesti yksi suoritettiin virtausarvoilla 300 l/min, 160 l/min ja 40 l/min, siten että jokaisella virtausarvolla on kolme sulatusta. Ensimmäisten tasetestien SQL-haun tulokset ovat nähtävissä liitteessä 5. Taulukossa 23 on nähtävissä jokaisen virtausarvolla suoritettujen testien keskiarvot. Tuloksia on korostettu maalamalla laatikot parhaimmasta huonoimpaan: vihreä, keltainen ja punainen.

TAULUKKO 23. Tasetesti yhden tulokset. Suurimmilla virtausnopeuksilla tuotannollisesti paremmat tulokset. Saantiprosentti muunnettu indeksiin

Virtausnopeus (l/min)	Tehot päällä (min)	Kaatolämpötila (°C)	kWh/t	kWh/t/kaatol.	Saanti (%)
300	43.67	1594	395.06	24.79 %	153.23
160	46.67	1569	398.16	25.37 %	152.22
40	48.00	1567	414.75	26.47 %	147.20

Typpi	Argon	Cr2O3	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)
5.95	46.43	3.60	2.00	4.33
7.92	34.13	4.40	2.67	10.67
1.24	8.87	13.50	4.00	13.33

Taulukkoa 23 analysoidessa voidaan todeta, että mitä suuremmilla virtausarvoilla syötetään kaasua, sitä tehokkaammin valokaariuuni toimii. Kyseinen tase-erä oli erityisen aggressiivisesti kuohuvaa, joten erityisesti kaadon kestossa ja kuohumisindeksissä on suuria eroja. Voidaan päätellä, että mitä nopeammin ja enemmän kaasua puhalletaan valokaariuuniin, sitä tehokkaammin se toimii.

Sattumanvaraisuuden minimoimiseksi samainen testi suoritettiin myöhemmin uudestaan. Kierrätysmateriaalin toimittaja 3:n kymmenestä tasesulatuksesta tehtiin muutoin samaiset testit, mutta virtausarvolla 40 l/min suoritettiin yhteensä neljä sulatusta kolmen sijaan. Seuraavalla sivulla olevassa taulukossa 24 on nähtävissä jokaisen eri virtausarvolla suoritetun testin keskiarvot ja liitteessä 5 kaikki sulatuskohtaiset tiedot. Liite 5 on opinnäytetyön toimeksiantajan hallussa.

TAULUKKO 24. Tasetesti kahden tulokset. Saantiprosentti muutettu indeksiin

Virtausnopeus (l/min)	Tehot päällä (min)	Kaatolämpötila (°C)	kWh/t	kWh/t/kaatol.	Saanti (%)
300	47.00	1614	407.67	25.26 %	161.85
160	48.33	1600	413.32	25.83 %	157.17
40	46.75	1590	413.99	26.05 %	144.29

Typpi	Argon	Cr2O3	Kuohuminen	Kaadon kesto (min)
5.15	47.71	7.65	1.67	8.33
4.03	29.55	5.43	2.00	9.67
1.26	8.74	13.58	2.25	11.50

Toisen tasetestin kierrätysromuerä ei ollut yhtä vahvasti reagoivaa kaadon yhteydessä. Silti on huomattavissa selvä ero kaadon kestossa ja kuohumisindeksissä. Tehot päällä -ajassa on pieni ero verrattuna tasetesti yhteen (taulukko 23). Tämä selittyy operaattorikohtaisella sulatustavalla, koska virtausarvojen 300 l/min ja 160 l/min testaus suoritettiin samalla ja arvon 40 l/min eri operaattorilla. Tätä tukee myös kWh/t per kaatolämpötilan pysyminen samana, mikä ei johdu operaattoreiden toimintatavasta.

Tasetestien aikana tuotantoprosessissa ei esiintynyt huomattavia katkoksia muuten kuin tasetesti kahden aikana virtausarvolla 40 l/min, jolloin senkkavaunu oli jumissa. Tästä seurasi noin 45 minuutin tauko, mutta sillä ei todennäköisesti ole suurta vaikutusta analysointeihin. Tasetesteissä toistuu lineaarinen samankaltaisuus, joten johtopäätöksenä on se, että mitä suuremmalla virtausnopeudella syötetään kaasua, sitä tehokkaampi valokaariuunin prosessi on rosterilaaduille.

7.3 Pohjahuhtelukivien kuluminen

Pohjahuhtelukivien kulumista on tuotannon aikana erittäin hankala seurata, ja tämän takia testejä suoritettaessa on oltava hyvin varovainen, jotta pohjahuhtelukivet ja uunin pohja eivät kuluisi liikaa. Pohjahuhtelukivien puhkeaminen voi pahimmillaan aiheuttaa tuotannon pysähtymisen useaksi vuorokaudeksi sekä suuria laitevaurioita. Kivien kulumista on seurattu jokaisen uunikampanjan aikana. Taulukossa 25 on esitetty pohjahuhtelukivien yhteenlaskettu

kuluminen vuoden 2015 uunikampanjoista. Jokaisen pohjahuuhtelukiven pituus on 850 mm ja yhteenlaskettuna niiden pituuden summa on 3 400 mm.

TAULUKKO 25. Uunikampanjoiden aikana pohjahuuhtelukivien kuluminen

Uunit	Σ Kuluma (mm)
1	300
2	380
3	1900
4	1000

Kolmannen uunikampanjan aikana huuhtelukivien kuluminen on ollut paljon suurempaa kuin muiden uunikampanjoiden aikana. Liitteessä 6 on esitetty uunikampanjoiden aikana tehdyt sulatukset, käytetyt virtausarvot sekä kaasumäärät normaalikuutiaina per sulatus. Taulukossa 26 on esitetty liitteen 6 tärkeimmät tiedot.

TAULUKKO 26. Uunikampanjoiden aikana puhalletut kaasumäärät

Uunit	Ar + N (Nm ³)	Kaasu/sulatus (Nm ³)	Sulatusten lkm.
1	4221.63	16.75	252
2	4685.92	18.89	248
3	7602.61	20.72	367
4	8007.61	23.14	346

Pohjahuuhtelukivien kuluminen on yhteydessä uunin pohjan kulumisen kanssa. Uunikampanjan kolme aikana pohja oli kulunut muihin uunikampanjoihin verrattanu erittäin paljon, mikä näkyy myös pohjahuuhtelukivien kulumisena (taulukko 25). Uuniin neljä oli laitettu reilusti enemmän ja eri merkkistä pohjamassaa, minkä takia uunin pohja ei ollut kulunut yhtä paljon kuin uunikampanjan kolme pohja. Kuvassa 16 on nähtävissä uunikampanjan kolme huuhtelukivi ja kehystiili.



KUVA 16. Pohjahuuhtelukivi ja kehystiili ennen uunin purkamista. Sulatuksia uunilla tehty 367 kappaletta

Uunin pohjanmassauksen määrällä ja laadulla muuraushallilla voidaan vaikuttaa huuhtelukivien ja pohjan kulumiseen. Virtausarvoja voidaan nostaa maltillisesti ylöspäin, jos uunin pohjan kulumista seurataan aktiivisesti. Huuhtelukivien kulumisessa ei ole keskenään huomattavia eroja, joten tästä päätellen pohjahuuhtelukivien kuluminen on yhteydessä pelkästään pohjan kulumisen kanssa.

7.4 Muut huomiot ja jatkotutkimukset

Kun tasetestejä suoritettiin, sulatuksen alussa tyypeä puhallettaessa virtausnopeuden maksimiarvo kaikilla huuhtelukivillä oli 215 l/min. Ensimmäisen tasetestin aikana kivet yksi, kaksi ja kolme olivat hieman tukossa, jolloin niiden virtausarvot olivat noin 250 l/min. Ensimmäisen sulatuksen aikana kuitenkin nämä molemmat kivet aukesivat virtausarvoon 300 l/min ja huuhtelukivi kaksi virtausarvoon 260 l/min. Toisen tasetestin aikana huuhtelukivet kaksi ja neljä olivat tukossa. Tasetesti kahta tehtäessä vain huuhtelukivi neljä aukesi täysin ja huuhtelukivi kaksi jäi virtausarvoon 60 l/min. Kun huuhtelukivien tukkeutuminen huomataan, niitä voisi koettaa aukaista puhaltamalla maksimivirtausnopeudella manuaalisesti.

Pohjahuuhteluvirtausarvojen asettamisen rajoitukseksi testien aikana huomattiin uunin pohjamassan ja pohjahuuhtelukivien kuluminen. Pohjamassan ja pohjahuuhtelukivien paksuuden ja laadun optimoinnilla pohjahuuhtelusta saataisiin paras hyöty irti. Happolaatujen osalta on syytä koettaa toistaa samankaltaiset tasetestit kuin rosterilaaduilla. Ei-tasetesteissä on huomattavissa samankaltaista käyttäytymistä kuin rosterilaatujen osalta. Pohjahuuhtelukivien ja pohjamassan kulumisen hallinnan jälkeen on syytä miettiä, pystytäänkö virtausnopeuksia nostamaan lisäämällä huuhteluputkien ja -kivien paksuutta ja lukumäärää.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli Outokummun terässulaton linja 2:n valokaariuunin pohjahuuhtelun optimointi tuotantoprosessin kannalta parhaaksi. Tärkeimpinä tavoitteina oli löytää virtausarvot, joilla kuohuminen vähenee, saanti paranee ja sulatusaika pienenee. Tavoitteisiin ei täysin päästy aikataulun, prosessin eri muuttujien ja työn haastavuuden takia. Vaikeimmaksi muuttujaksi osoittautui kierrätysmateriaalin ainepitoisuuksien vaihtelu. Tämä minimoitiin käyttämällä saman toimittajan samankaltaisia kierrätysmateriaalierä.

Tuloksia vertailtaessa ei-tasesulatuksilla ei ole huomattavia eroja. Tämä aiheutunee kierrätysmateriaalien ainepitoisuuksien vaihteluista, eri operaattoreiden sulatustavoista, kierrätysmateriaalin lumipitoisuudesta, kuonan koostumuksen vaihteluista, kylkipoltintesteistä sekä muista tuotannon häiriöistä. Tämän takia päädyttiin tekemään pitkien tasesulatusten aikana testejä eri virtausarvoilla. Tuotannollisista syistä nämä tasetestit onnistui tehdä pelkästään rosterilaaduilla, koska tasesulatuksia happolaaduilla tehdään huomattavasti vähemmän. Tasetesti testattiin kahdesti, ja kummallakin kerralla tulokset olivat samansuuntaiset: mitä suuremmilla virtausarvoilla pohjahuuhtelulla puhallettiin, sitä tehokkaammin valokaariuunin prosessi toimi rosterilaaduilla.

Happolaaduilla on ei-tasetesteissä samankaltaista taipumusta kuin rosterilaaduilla, mistä voidaan päätellä happolaatujen toimivan samalla tavalla. Tätä ei kuitenkaan keritty kokeilemaan aikataulun puitteissa.

Pohjamassan ja huuhtelukivien kulumisen takia pohjahuuhtelua ei voida käyttää maksimiarvoilla. Ilman prosessin vaarantamista ei voida testata, kuinka pitkän ajan maksimivirtausarvoilla voidaan käyttää pohjahuuhtelua. Tämä vaatii lisätutkimuksia pohjahuuhtelukivien ja pohjamassan laadun ja määrän optimoimisesta. Tuotannon kannalta optimaalisimpia virtausarvoja ei tulla näillä huuhtelukivillä saavuttamaan, joten on syytä lisätä huuhtelukivien ja -putkien kokoa ja lukumäärää. Sulan sekoittumista valokaariuunissa voitaisiin myös lisätä elektromagneettisilla sekoittajilla.

LÄHTEET

1. Vuosikertomus 2013. Outokumpu Oy. Saatavissa: http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Outokumpu_Vuosikertomus%202013.pdf. Hakupäivä 18.2.2015.
2. Kauppi, Timo 2006. Ruostumaton teräs ja sen valmistusprosessi. Luentomateriaali luku 3. FeCr- ja sulattoprosessit. Versio 1.1. 16.3.2006. Kemi-Tornion AMK.
3. Kunelius, Juho 2105. VKU-tutkija, Outokumpu TRC. Suullinen tiedonanto 3.3.2015. Tornio.
4. Kirchen, M. – Badr, K. – Cappel, J. 2009. Chemical energy and bottom stirring systems – Cost effective solutions for a better performing EAF. International Journal of ISSI, Vol.6, No. 1.
5. Gramberger, Knapp 2001. Valokaariuunin tekninen prosessikuvaus. Sisäinen raportti FSL-Doc.No.OTF.SE.2/PBS001. Avesta Polarit Stainless.
6. Hyttinen, Niko 2012. Kierrätysteräksen laadun vaikutus valokaariuuniprosessissa tapahtuvaan kaasunmuodostukseen. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto, prosessi- ja ympäristötekniikan osasto.
7. Karassaari, Olli-Pekka 2008. Valokaariuunin energiatase ja kaatolämpötilan mallinnus. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto, prosessi- ja ympäristötekniikan osasto.
8. Bowman, Ben - Kruger, Klaus. 2009. Arc Furnace Physics. Dusseldorf. Verlag Stahleisen GmbH.
9. Juntunen, Veikko 2004. VKU2:n kuonametallurgian hallinta. Sisäinen raportti 5397-5489/03. Outokumpu Stainless Oy, Tornio tehtaas.
10. Pieskä, Vesa 2005. Valokaariuuni 2:n panoksen kemiallisen energian hallittu käyttö. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto, prosessi- ja ympäristötekniikan osasto.

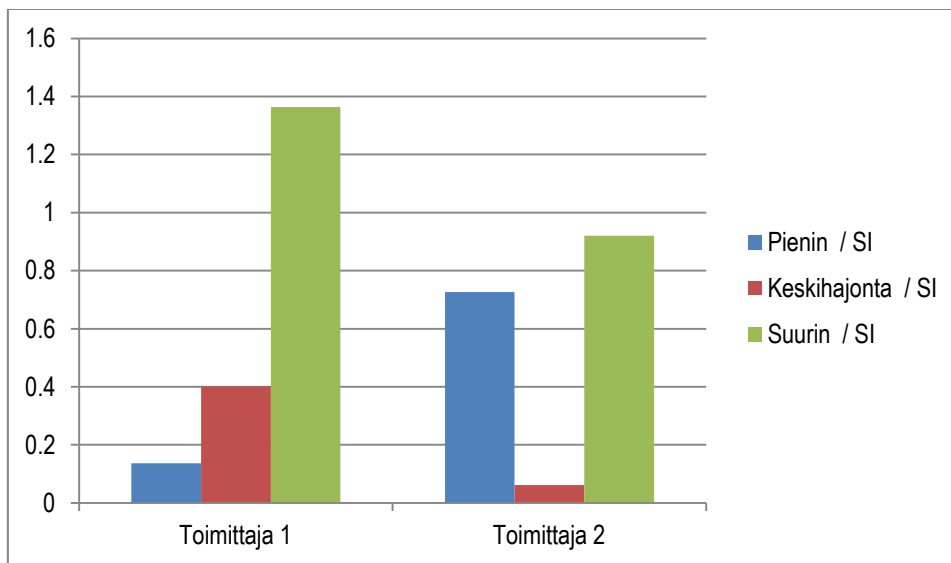
11. Oinas, Miikka. 2009. Savukaasujen jatkuvatoiminen mittaus VKU2:n ohjauksen kehittämisessä. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto.
12. Kunelius, Juho 2010. Valokaariuunin 2:n kaatolämpötilan mallinnus. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto, prosessi- ja ympäristötekniikan osasto.
13. Pfeifer, H – Kirschen, M – Simoes, J.P. 2005. Thermodynamic analysis of EAF electrical energy demand, teoksessa: 8th European electric steelmaking conference proceedings, Birgham 2005, s. 211-232.
14. Wilson, Ed – Kan, Mike – Mirle, Anjan. Intelligent technologies for electric arc furnace optimization. North Star Steel. Minnesota. Saatavissa: http://intellization.com/files/eaf_optimization_presentation_EFC_98.pdf. Hakupäivä 24.2.2015.
15. Van Wijngaarden, M.J.U.T – Pieterse, A.T. 1994. Bottom-stirring in an electric-arc furnace: Performance results at Iscor Vereeniging Works. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, January 1994.
16. Kirchen, M. 2013. EAF Gas Purging. Esite. RHI AG. Outokumpu, Tornio 16.10.2013.
17. Kunelius, Juho. 2014. Pohjahuuhtelun ja kylkipolttimien käyttöönotto syksy 2014. Sisäinen raportti TRC20140044. Outokumpu Stainless Oy, Tornion tehtaas.
18. Niemi, Tommi – Rinne, Erkki 2014. Pohjahuuhtelun toimintakuvaus, käyttö- ja huolto-ohje FI15900-1. Oy AGA Ab. Sisäinen raportti Doc. No 1128864.
19. Rinne, Erkki 2014. 03004.2-Sähkö-VKU2 pohjahuuhtelu, operaatiopaneelin käyttöohje FI15901-1. Oy Aga Ab. Sisäinen raportti Doc. No 223435

LIITE 1

[illegible]

TAULUKKO 1. Laskettu piin kemiallisen energian sisällön vaihtelu

Ostoteräs määrä (130t)	Min. Pii (kg)	Max. Pii (kg)	Erotus
Toimittaja 1	177.30	1772.90	1595.60
Toimittaja 2	944.70	1196.50	251.80
Pii energia kWh/kg	Lämpösisältö (kWh)	kWh/t panos(150t)	
8.94	14264.66	95.10	
8.94	2251.09	15.01	

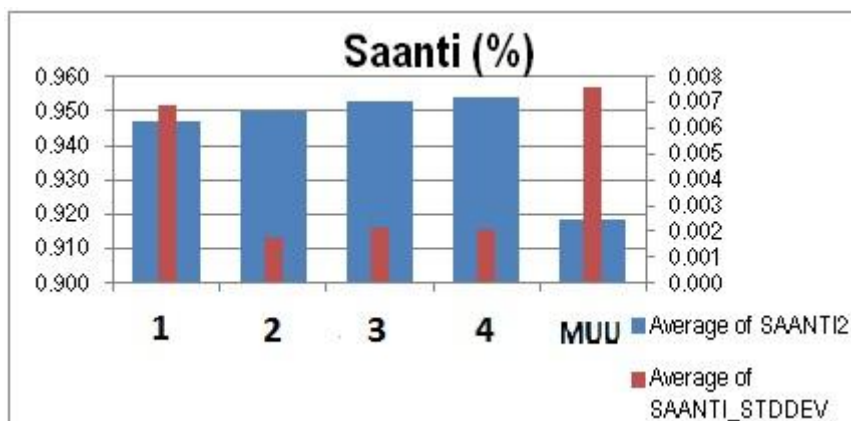


KUVA 1. Kaavio eri toimittajien piipitoisuuksien vaihteluista

Lähde: Karppanen, Kimmo 2015. Diplomityön tekijä. Outokumpu TRC, Tornion tehtaas.

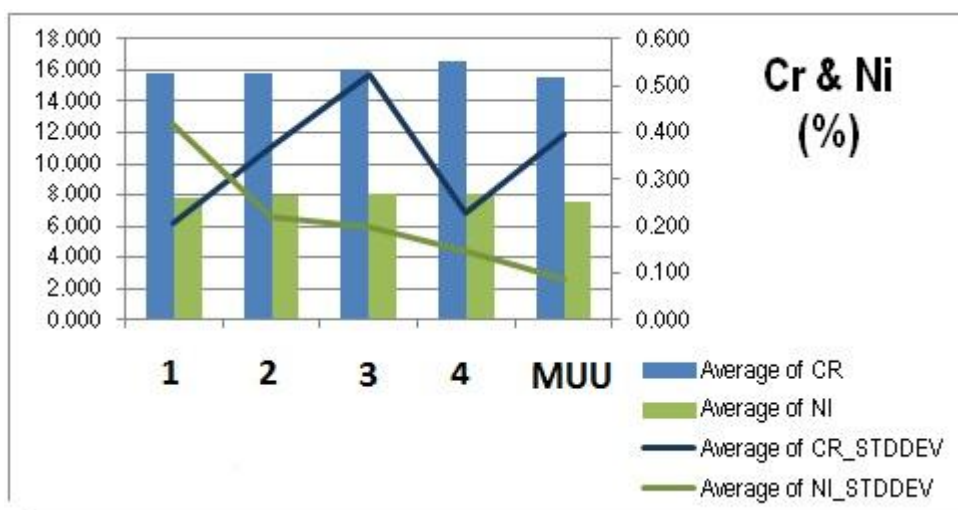
Rosterilaatu

Toimittaja 1:n sulatuksia 18, toimittaja 2:n 56, toimittaja 3:n 40, toimittaja 4:n 39 ja muita 27 kappaletta. Saannin kannalta ei ole mielekästä vertailla muiden toimittajien sulatuksia, koska niiden saanti eroaa ratkaisevan paljon muista. Keskihajonnat eroavat jonkin verran toisistaan, mutta hajonta on kuitenkin niin pientä, ettei sitä tarvitse huomioida (kuva 1).

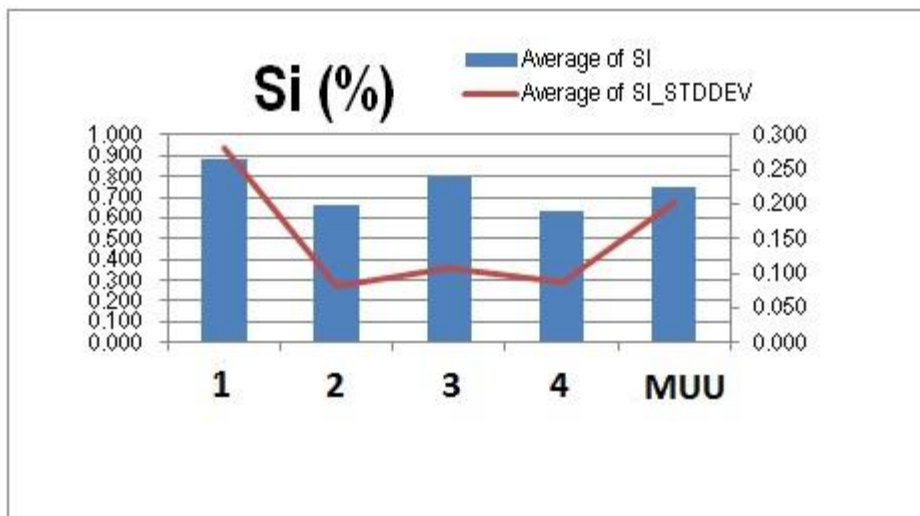


KUVA 1. Saannin vertailu eri toimittajien kesken

Kuvista 2 ja 3 voidaan päätellä, että toimittaja 1:ltä ja muilla toimittajilta löytyy suurimmat erot keskenään. Toimittaja 2:n ja 3:n keskiarvolliset pitoisuudet ja keskihajonnat muistuttavat kovin toisiaan, ja näitä on mielekästä käyttää vertailukohteina. Toimittaja 4:n materiaaleista tehtyjä sulatuksia voidaan vertailla toisiinsa, vaikka kromin hajonta onkin suurta.



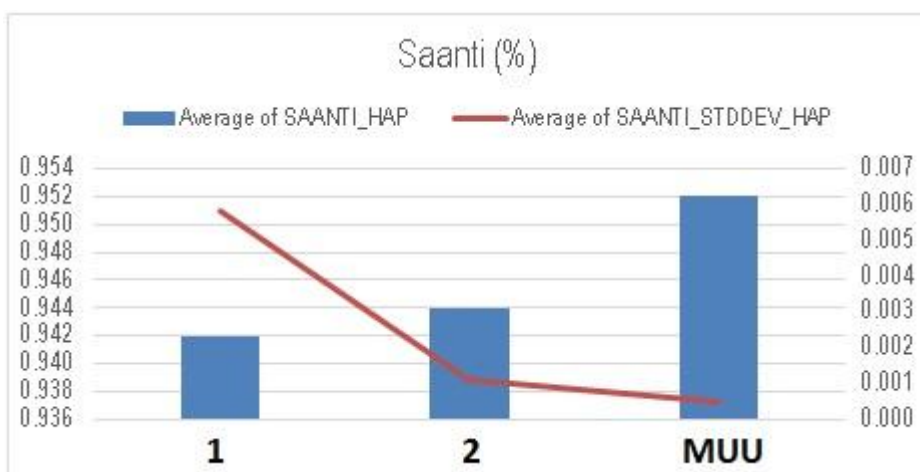
KUVA 2. Kromin ja nikkelin pitoisuudet eri toimittajien kesken



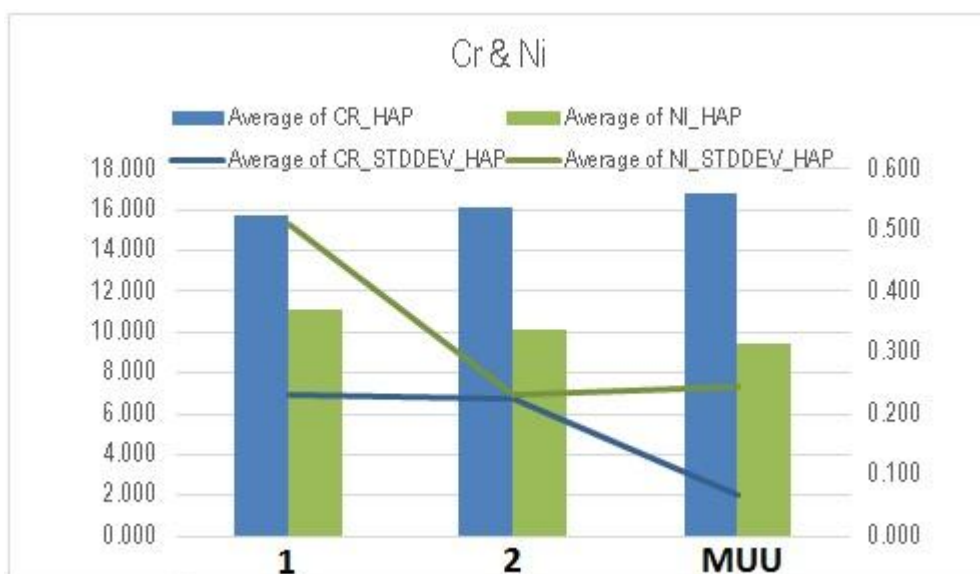
KUVA 3. Piipitoisuudet eri toimittajien kesken

Happolaatu

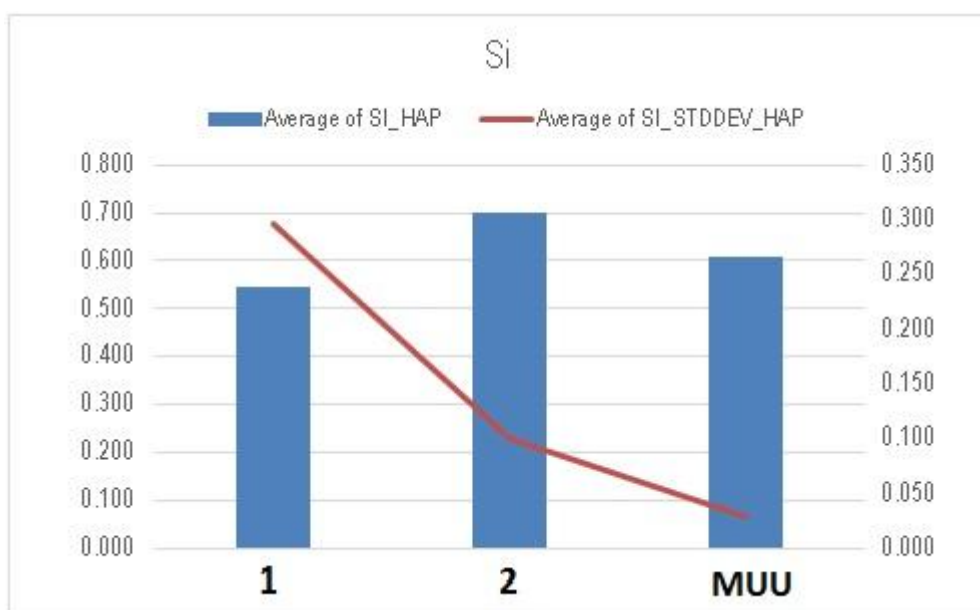
Toimittaja 1:n sulatuksia on yhteensä 23, toimittaja 2:lla 12 ja muilla pelkästään 3. Näin ollen muita sulatuksia ei ole mielekästä ottaa mukaan vertailuun. Kuvissa 4, 5 ja 6 on vertailtu eri toimittajien saantia sekä kromin, nikkelin ja piin pitoisuuksia. Toimittaja 1:llä ja toimittaja 2:lla sulatuksissa on paljon eroja etenkin piin keskiarvossa ja keskihajonnassa. Tämä on otettava huomioon johtapäätöksiä tehtäessä.



KUVA 4. Saanti eri toimittajien happolaaduilla



KUVA 5. Kromin ja nikkelin pitoisuudet happolaaduilla



KUVA 6. Piipitoisuudet happolaaduilla

TAULUKKO 1. Virtausarvot 40 l/min

	Virtausnopeudet (l/min)					
	Askel	Kaasu	Tiili 1	Tiili 2	Tiili 3	Tiili 4
Käsiajoarvot	0	N2	0	0	0	0
Tehot pois, perusvirtaus	1	N2	30	30	30	30
Tehot päälle, ensimmäinen kori	2	N2	40	40	40	40
Käytetty energia 100kWh/t	3	Ar	40	40	40	40
Tehot päälle, toinen kori	4	Ar	40	40	40	40
Tehot päälle, kolmas kori	5	Ar	40	40	40	40
Tehot päälle, neljäs kori	6	Ar	40	40	40	40
Tehot päälle, viides kori	7	Ar	40	40	40	40
Lanssaus alkaa	8	Ar	40	40	40	40
Kaato	9	Ar	40	40	40	100
Kaato ohi, perusvirtaus	10	N2	30	30	30	30

TAULUKKO 2. Virtausarvot 100 l/min

	Virtausnopeudet (l/min)					
	Askel	Kaasu	Tiili 1	Tiili 2	Tiili 3	Tiili 4
Käsiajoarvot	0	N2	0	0	0	0
Tehot pois, perusvirtaus	1	N2	30	30	30	30
Tehot päälle, ensimmäinen kori	2	Ar	100	100	100	100
Käytetty energia 100kWh/t	3	Ar	100	100	100	100
Tehot päälle, toinen kori	4	Ar	100	100	100	100
Tehot päälle, kolmas kori	5	Ar	100	100	100	100
Tehot päälle, neljäs kori	6	Ar	100	100	100	100
Tehot päälle, viides kori	7	Ar	100	100	100	100
Lanssaus alkaa	8	Ar	100	100	100	100
Kaato	9	Ar	40	40	40	120
Kaato ohi, perusvirtaus	10	N2	30	30	30	30

TAULUKKO 3. Virtausarvot 40 - 100 l/min

	Virtausnopeudet (l/min)					
	Askel	Kaasu	Tiili 1	Tiili 2	Tiili 3	Tiili 4
Käsiajoarvot	0	N2	0	0	0	0
Tehot pois, perusvirtaus	1	N2	30	30	30	30
Tehot päälle, ensimmäinen kori	2	N2	40	40	40	40
Käytetty energia 100kWh/t	3	Ar	60	60	60	60
Tehot päälle, toinen kori	4	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, kolmas kori	5	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, neljäs kori	6	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, viides kori	7	Ar	80	80	80	80
Lanssaus alkaa	8	Ar	100	100	100	100
Kaato	9	Ar	40	40	40	120
Kaato ohi, perusvirtaus	10	N2	30	30	30	30

TAULUKKO 4. Virtausarvot 100 - 40 l/min

	Virtausnopeudet (l/min)					
	Askel	Kaasu	Tiili 1	Tiili 2	Tiili 3	Tiili 4
Käsiajoarvot	0	N2	0	0	0	0
Tehot pois, perusvirtaus	1	N2	30	30	30	30
Tehot päälle, ensimmäinen kori	2	N2	100	100	100	100
Käytetty energia 100kWh/t	3	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, toinen kori	4	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, kolmas kori	5	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, neljäs kori	6	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, viides kori	7	Ar	80	80	80	80
Lanssaus alkaa	8	Ar	60	60	60	60
Kaato	9	Ar	40	40	40	120
Kaato ohi, perusvirtaus	10	N2	30	30	30	30

TAULUKKO 5. Virtausarvot 150 - 40 l/min

	Virtausnopeudet (l/min)					
	Askel	Kaasu	Tiili 1	Tiili 2	Tiili 3	Tiili 4
Käsiajoarvot	0	N2	0	0	0	0
Tehot pois, perusvirtaus	1	N2	30	30	30	30
Tehot päälle, ensimmäinen kori	2	N2	150	150	150	150
Käytetty energia 100kWh/t	3	Ar	100	100	100	100
Tehot päälle, toinen kori	4	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, kolmas kori	5	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, neljäs kori	6	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, viides kori	7	Ar	80	80	80	80
Lanssaus alkaa	8	Ar	60	60	60	60
Kaato	9	Ar	40	40	40	120
Kaato ohi, perusvirtaus	10	N2	30	30	30	30

TAULUKKO 6. Virtausarvot 120 - 60 l/min

	Virtausnopeudet (l/min)					
	Askel	Kaasu	Tiili 1	Tiili 2	Tiili 3	Tiili 4
Käsiajoarvot	0	N2	0	0	0	0
Tehot pois, perusvirtaus	1	N2	30	30	30	30
Tehot päälle, ensimmäinen kori	2	N2	120	120	120	120
Käytetty energia 100kWh/t	3	Ar	100	100	100	100
Tehot päälle, toinen kori	4	Ar	60	60	60	60
Tehot päälle, kolmas kori	5	Ar	60	60	60	60
Tehot päälle, neljäs kori	6	Ar	60	60	60	60
Tehot päälle, viides kori	7	Ar	60	60	60	60
Lanssaus alkaa	8	Ar	60	60	60	60
Kaato	9	Ar	60	60	60	120
Kaato ohi, perusvirtaus	10	N2	30	30	30	30

TAULUKKO 7. Virtausarvot 160 l/min

	Virtausnopeudet (l/min)					
	Askel	Kaasu	Tiili 1	Tiili 2	Tiili 3	Tiili 4
Käsiajoarvot	0	N2	0	0	0	0
Tehot pois, perusvirtaus	1	N2	30	30	30	30
Tehot päälle, ensimmäinen kori	2	N2	160	160	160	160
Käytetty energia 100kWh/t	3	Ar	160	160	160	160
Tehot päälle, toinen kori	4	Ar	160	160	160	160
Tehot päälle, kolmas kori	5	Ar	160	160	160	160
Tehot päälle, neljäs kori	6	Ar	160	160	160	160
Tehot päälle, viides kori	7	Ar	160	160	160	160
Lanssaus alkaa	8	Ar	160	160	160	160
Kaato	9	Ar	160	160	160	160
Kaato ohi, perusvirtaus	10	N2	30	30	30	30

TAULUKKO 8. Virtausarvot 60 - 120 l/min

	Virtausnopeudet (l/min)					
	Askel	Kaasu	Tiili 1	Tiili 2	Tiili 3	Tiili 4
Käsiajoarvot	0	N2	0	0	0	0
Tehot pois, perusvirtaus	1	N2	30	30	30	30
Tehot päälle, ensimmäinen kori	2	N2	60	60	60	60
Käytetty energia 100kWh/t	3	Ar	80	80	80	80
Tehot päälle, toinen kori	4	Ar	100	100	100	100
Tehot päälle, kolmas kori	5	Ar	100	100	100	100
Tehot päälle, neljäs kori	6	Ar	100	100	100	100
Tehot päälle, viides kori	7	Ar	100	100	100	100
Lanssaus alkaa	8	Ar	120	120	120	120
Kaato	9	Ar	120	120	120	120
Kaato ohi, perusvirtaus	10	N2	30	30	30	30

TASETESTIT

LIITE 1/5

Toimeksiantajan hallussa.

TASETESTIT

LIITE 2/5

Toimeksiantajan hallussa.

Uunit	Virtausarvot (l/min)	Typpi (Nm3)	Argon (Nm3)	Ar + N (Nm3)	Sulatuksket	Kaasu/sulatus (Nm3)	Alkaväli	Kivet	Pituus	Kuluma	ΣKuluma
1	40	86,57	394,72	481,29	45,00	10,70	20.1.-5.2.	1	800	50	300
	100	223,44	1307,71	1531,15	65,00	23,56		2	740	110	
	40-100	143,33	1462,16	1605,49	95,00	16,90		3	740	110	
	100-40	111,59	492,11	603,70	47,00	12,84		4	820	30	
Yhteensä		564,93	3656,70	4221,63	252,00	16,75					
2	100-40	340,24	1234,99	1575,23	95,00	16,58	5.2.-19.2.	1	800	50	380
	150-40	663,11	1765,80	2428,91	122,00	19,91		2	780	70	
	120-60	125,33	556,45	681,78	31,00	21,99		3	660	190	
Yhteensä		1128,68	3557,24	4685,92	248,00	18,89		4	780	70	
3	40	158,66	1177,30	1335,96	109,00	12,26	19.2.-11.3.	1	350	500	1900
	120-60	786,39	3474,51	4260,90	210,00	20,29		2	350	500	
	160	249,51	1756,24	2005,75	48,00	41,79		3	380	470	
Yhteensä		1194,56	6408,05	7602,61	367,00	20,72		4	420	430	
4	40-100	229,05	1929,76	2158,81	137,00	15,76	11.3.-1.4.	1	620	230	1000
	100-40	40,59	177,98	218,57	14,00	15,61		2	610	240	
	160	607,47	2810,22	3417,69	87,00	39,28		3	520	330	
	60-120	229,86	1982,68	2212,54	108,00	20,49		4	650	200	
Yhteensä		1106,97	6900,64	8007,61	346,00	23,14					
		3995,14	20522,63	24517,77	1213,00	20,21					

KUVA 1. Pohjahuhtelukivien kulumiset ja syötetyt kaasumäärät eri uuneilla ja virtausarvoilla